

**6º**  
**ENC** ONTRO NACIONAL  
SOBRE APROVEITAMENTO  
DE **RESÍDUOS** NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL

**Anais**  
**2019**

ISSN 2175 - 1870



## APRESENTAÇÃO

### **6º** **ENCONTRO NACIONAL** **SOBRE APROVEITAMENTO** **DE RESÍDUOS NA** **CONSTRUÇÃO CIVIL**

O 6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC 2019) é um evento organizado pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA). O evento é promovido pelo GT Resíduos, da ANTAC, e dá continuidade à série iniciada na UEFS (Feira de Santana - 2009), com sequência na UFAL (Maceió - 2011), na UNISINOS (São Leopoldo - 2013), na Poli-USP (São Paulo - 2015) e na UFC (Fortaleza - 2017). O evento foi realizado em Belém/PA, nos dias 30 e 31 de outubro, no Campus Universitário Profissional da Universidade Federal do Pará.



## FICHA TÉCNICA

### COMITÊ ORGANIZADOR

Antonio Eduardo Bezerra Cabral - UFC

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro - UFPA

Luiz Maurício Furtado Maués - UFPA

Mônica Batista Leite - UEFS

Sofia Araújo Lima Bessa - UFMG

### INSTITUIÇÕES ENVOLVIDAS

Universidade Federal do Pará – UFPA

Universidade Federal do Ceará - UFC

Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC)

### DIRETORIA DO ANTAC

Sergio Scheer (UFPR), Presidente

Roberta Vieira Gonçalves de Souza (UFMG), vice-presidente

Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS), diretor financeiro

Túlio Márcio de Salles Tibúrcio (UFV), diretor administrativo

Edna Possan (UNILA), diretora de relações inter-institucionais

Lúcia Helena de Oliveira (USP), Diretora de divulgação

### EDITORES E COMISSÃO CIENTÍFICA

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro (UFPA), (Presidente)

Antonio Eduardo Bezerra Cabral (UFC), (Vice-presidente)

**6º**  
**ENCANTRO NACIONAL**  
**SOBRE APROVEITAMENTO**  
**DE RESÍDUOS NA**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**



## MEMBROS DO COMITÊ AVALIADOR

Abrahaõ Bernardo Rohden  
Adeildo Silva  
Alexsandra Meira  
Amanda Vieira  
Ana Amelia Mota  
Ana Paula Gonçalves  
Ana Paula Maran  
Anderson Muller  
Andrea Kern  
Andrielli Oliveira  
Angela Teresa Costa Sales  
Antonio Eduardo Bezerra Cabral  
Ariane Rubin  
Augusto Bezerra  
Augusto Bopsin  
Camila Louzado Del Rei Dantas  
Camila Rocha  
Camila Salvi Malacarne  
Carina Stolz  
Carina Ulsen  
Caroline Giordani  
Cesar Winter de Mello  
Cleudson Guimarães  
Cristiane Pauletti  
Cristina Vitorino Silva  
Cristóvão Cordeiro  
Daniel Pagnussat  
Diego Haltiery  
Edna Possan  
Eduardo Polesello  
Elaine Guglielmi Pavei Antunes  
Eugênio Costa  
Felipe Reis  
Fernanda Lamego Guerra  
Fernanda Nepomuceno Costa  
Fernando C. R. Almeida  
Francieli Tiecher  
Francisco Gabriel Santos Silva  
Frederico Moreira  
Geilma Vieira  
Gladis Camarini  
Guilherme Cordeiro

Hélio Guimarães  
Iago Santos  
Isaura Paes  
João Mota  
José da Silva Andrade Neto  
Juliana Petermann Moretti  
Júnior Ishihara  
Kelvyta Moreira  
Lais Zucchetti  
Leonardo Miranda  
Luciana Queiroz  
Luiz Maurício Maués  
Marcelo Aguiar  
Marcelo Massulo  
Marcelo Pedreira  
Marcelo Picanço  
Maria Fernanda Menna Barreto  
Marianna Luna Rivetti  
Márlon Longhi  
Marlova Kulakowski  
Mauricio Ferreira  
Mércurie Janeai Rocha  
Mônica Leite  
Natália Dos Santos Petry  
Nívea G B Albuquerque  
Patrícia Lovato  
Paulo Roberto Lima  
Paulo Sérgio Souza  
Rafaela Falcão Socoloski  
Renato Neves  
Ricardo Girardi  
Richard Thomas Lermen  
Rodrigo de Almeida Silva  
Ruan Carlos De Araújo Moura  
Safira Rios  
Sayonara Pinheiro  
Sergio Santos de Jesus  
Simone Venquiaruto  
Sofia Bessa  
Thiago Grabois  
Tiago Assunção  
Uiliana Mercês  
Valquiria Santana  
Vanessa Lúcia Carneiro



## PALESTRANTES

### **ANTONIO EDUARDO BEZERRA CABRAL (UFC), prof. Dr.**



Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (1997), mestrado em Engenharia Civil (Construção Civil) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2000), doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (2007), com estágio no exterior (University of Technology, Sydney - Austrália) e estágio de pós-doutorado na Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-Barcelona, Espanha, 2012). Atualmente é professor Adjunto do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil (DEECC) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Atua no ensino de graduação em Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil (PEC) da UFC, além de participar e coordenar vários projetos de pesquisa e de extensão. Tem experiência na área de Construção Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: diagnóstico de manifestações patológicas em edificações, reparo e reforço do concreto armado, tecnologia do concreto e de argamassas, uso de materiais não convencionais na construção civil e gestão de resíduos sólidos da construção civil.\*

### **DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN (UFRGS), prof. Dr.**



Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1982), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1988) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (1995). Atualmente é Professora Titular e pesquisadora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Construção Civil. Desenvolve, principalmente, os seguintes temas: tecnologia de concretos convencionais e especiais, aproveitamento de resíduos em materiais de construção, desenvolvimento de novos materiais, avaliação de desempenho de materiais e componentes da construção, patologia e recuperação de estruturas e construções, e processos construtivos. Atua, de forma equilibrada, no tripé que sustenta a universidade: ensino, pesquisa e extensão. Na área administrativa, foi coordenadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil por duas gestões seguidas. Participou como membro da Comissão Coordenadora do PPGECC e membro do Colegiado do Departamento de Engenharia Civil em diversas gestões. Fez parte, ainda, do Conselho da Escola de Engenharia e do Fórum dos Coordenadores da UFRGS. Foi diretora da Escola de Engenharia da UFRGS na gestão 2008-2012.\*

## **RICARDO ANDRÉ FIOROTTI PEIXOTO (UFOP), prof. Dr.**



Pesquisador Desenvolvimento Tecnológico CNPq DT-II - Tecnologia para o Desenvolvimento Sustentável, Coordenador Programas Profissionais PPGP CAPES - Engenharias I (2018-2022), Coordenador do Grupo de Pesquisas RECICLOS CNPq. Especialista homologado pelo PORTAL INOVAÇÃO - MCTI. Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1996), MSc. Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (1999) e DSc. Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2004). Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto PROPEC, Coordenador do Laboratório de Materiais de Construção Civil - Imc2./DECIV/EM/UFOP. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Componentes de Construção, Processos Construtivos e Construção Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: tecnologia de materiais, processos construtivos, construção civil, materiais de construção; manejo, tratamento e reciclagem de resíduos sólidos industriais, reciclagem e reutilização, sustentabilidade.\*

## **VANDERLEY MOACYR JOHN (USP), prof. Dr.**



Engenheiro Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (1982), mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1987) e Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (1995). Pós-doutorado no Royal Institute of Technology da Suécia (2001). Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, coordena o INCT Tecnologias Ecoeficientes Avançadas em Produtos Cimentícios (CEMtec [www.cemtec.org](http://www.cemtec.org)) e da Unidade EMBRAPPII Poli USP Materiais para Construção Ecoeficiente. Coordenador do IRIS Interdisciplinary Research for Innovative Solutions, parte do inova USP, organização dedicada a estruturar e gerir projetos de pesquisa interdisciplinares em parceria com empresas e órgãos da sociedade. É membro do Conselho Executivo da Agência USP Inovação desde 2012. Foi membro da coordenação das Engenharias da FAPESP e do CA Engenharia Civil do CNPq, da diretoria executiva da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído e diretor do CB2 da ABNT. Especializado em Materiais e Componentes de Construção e Construção Sustentável atua em temas como cimento, fibrocimento, uso de resíduos como matérias primas, materiais e desenvolvimento sustentável, materiais avançados, argamassas de revestimento e colantes, durabilidade (incluindo biodeterioração), compósitos aplicados à construção civil e métodos simplificados de avaliação do ciclo de vida.\*



## PROGRAMAÇÃO

### Dia 30/10 – Quarta-feira

- 07:30 Credenciamento  
08:30 Abertura do Evento  
Agregados de Resíduos de Construção e Demolição: atuais desafios para sua utilização em escala industrial– Prof. Dra. Denise Dal Molin  
09:30  
10:20 Coffee Break  
10:35 Painel 01  
11:35 Sessão Técnica 01  
12:00 Intervalo de almoço  
Uso de Resíduos de Mineração na Construção Civil – Prof. Dr. Ricardo Fiorotti  
14:00  
15:00 Painel 02  
16:00 Sessão Técnica 02  
17:00 Coquetel de Abertura

#### Painel 01 – Moderador:

- 10:35 – Moderador:  
10:45 – Produção de cinzas agroindustriais pozolânicas via lixiviação ácida, queima conjugada e moagem ultrafina  
11:05 - Study of red mud as a filler in cement matrix

#### Sessão Técnica 01 – Coordenador:

- 11:35 – Dosagem de concreto asfáltico usinado a quente utilizando resíduos de construção e demolição (RCD) em pavimento flexível  
11:45 - Utilização de resíduos da construção civil e demolição em compósitos poliméricos: características físicas, mecânicas e de inflamabilidade

#### Painel 02 – Moderador:

- 15:00 – Moderador:  
15:10 – Espectroscopia de reflectância aplicada à caracterização de materiais cimentícios suplementares e resíduos.  
15:30 - Produção de clínquer Portland com resíduo de construção civil: influência da geometria do pellet na formação das fases mineralógicas.

#### Sessão Técnica 02 – Coordenador:

- 16:00 – Elementos tubulares de papel reciclado utilizado como elemento construtivo: uma possibilidade viável de uso de resíduos em termos técnicos, econômicos e de sustentabilidade ambiental.  
16:10 - Comportamento físico-mecânico e térmico de placas cimentícias com resíduo de borracha de pneu para uso em forros de edificações.  
16:20 – Análise bibliográfica do uso de adições pozolânicas e métodos de mistura modificados em concretos de agregados reciclados  
16:30 - Agregado graúdo reciclado de concreto em substituição ao agregado natural na produção de concreto com função estrutural

### Dia 31/10 – Quinta-feira

- 08:30 Sessão Técnica 03  
Os desafios do Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil – Prof. Dr. Vanderley John  
09:00  
10:00 Coffee Break  
10:15 Painel 03  
11:15 Sessão Técnica 04  
12:00 Intervalo de Almoço  
Estudo do uso das cinzas de termoelétricas na construção civil e na pavimentação: da teoria à prática– Prof. Dr. Eduardo Cabral  
14:00  
15:00 Painel 04  
16:00 Sessão Técnica 05  
17:00 Coquetel de Encerramento

#### Sessão Técnica 03 – Coordenador:

- 08:30 – Permeabilidade e absorção de concretos com substituição parcial do cimento por resíduo de corte de mármore e granito (RCMG)  
08:40 – Processamento e caracterização de agregado miúdo de casca de mexilhão

#### Painel 03 – Moderador:

- 10:15 – Painel 03  
10:25 - Análise da viabilidade da produção de blocos de concreto com utilização de agregados reciclados  
10:45 – Influência do uso do jigge à água nas propriedades dos agregados graúdos reciclados de RCD

#### Sessão Técnica 04 – Coordenador:

- 11:15 - Avaliação do caroço de açaí "in natura" para uso como agregado graúdo leve  
11:25 – Argamassa contendo óxido de ferro recuperado da drenagem ácida de minas para uso em blindagens de radiação  
11:35 - Propriedades de microconcretos com diatomita calcinada submetidos ao ataque por ácido sulfúrico

#### Painel 04 – Moderador:

- 15:00 – Painel 02  
15:10 – Influência das fibras recicladas de pet como reforço de adobe  
15:30 - Avaliação do ciclo de vida de argilas calcinadas passíveis de uso em cimento LC3

#### Sessão Técnica 05 – Coordenador:

- 16:00 – Execução de trecho experimental de pavimento com cimento de RCD  
16:10 - Stabilization of compressed earth blocks with lime and ore tailings  
16:20 – Construction and demolition waste as recycled aggregate: a literature review of studies developed in Brazil

## ARTIGOS

<b>EFEITO DO USO DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO</b> THIAGO MENDES LEAL DA SILVA; MONALISA RENATA PINHEIRO CHAVES; WELINGTON RODRIGO CHAGAS LIMA.....	1
<b>AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE BIOCONCRETOS DE BAMBU</b> LUCAS CALDAS; VANESSA ANDREOLA; ROMILDOTOLEDO FILHO.....	15
<b>AVALIAÇÃO DO CAROÇO DE AÇAÍ “IN NATURA” PARA USO COMO AGREGADO GRAÚDO LEVE</b> MARCO ANTÔNIO BARBOSA DE OLIVEIRA; KLEBER ROBERTO MATOS DA SILVA; MARCOS VITOR MESCOUTO MIRANDA; RUAN PINHEIRO COSTA; STEFANY COSTA BRANDÃO.....	30
<b>ESTADO DO CONHECIMENTO ACERCA DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS E NORMATIVAS PARA PARA USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL</b> JULIA BARRETO HANDRO; ELAINE PINTO VARELA ALBERTE.....	40
<b>SITUAÇÃO E EVOLUÇÃO DO SETOR DE RECICLAGEM DE RCD NO BRASIL</b> JADI TOSTA VENTIN IGLESIAS; ELAINE PINTO VARELA ALBERTE.....	53
<b>A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE SOBRE A GESTÃO E RECICLAGEM DE RCD EM SALVADOR (BAHIA-BRASIL)</b> JADI TOSTA VENTIN IGLESIAS, ELAINE PINTO VARELA ALBERTE, ALEX PIRES CARNEIRO.....	63
<b>ESTABILIZAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA COM CAL E REJEITO DE MINERAÇÃO</b> NAVARRO, A. C.; MARESTI, J.; ARRUDA, E. A. M.; HERMENEGILDO, G. C. BESSA, S. A. L.....	78
<b>AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DEFLECTOMETRIA DE PAVIMENTO COM CIMENTO DE RCC</b> VALDIR MORAES PEREIRA; RAPHAEL BALDUSCO; VALDECIR ANGELO QUARCIONI; RUBENS VIEIRA; ELAINE SOARES; PATRICIA BARBOZA DA SILVA; SÉRGIO CIRELLI ÂNGULO.....	87
<b>ARGAMASSA AUTONIVELANTE COM FIBRAS DE POLIPROPILENO</b> LUIZ CLAUDIO DOS SANTOS MATNI; BERNARDO BORGES POMPEU NETO; MARCO ANTÔNIO BARBOSA DE OLIVEIRA; DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO.....	101
<b>ANÁLISE DO USO DE AREIA DE BRITAGEM EM SUBSTITUIÇÃO À AREIA NATURAL NA FABRICAÇÃO DE PAVERS</b> NATÁLIA BACH; BEATRIZ SCHIMELFENIG; JÉSSICA WOITYSIK; GABRIEL DALLA VECHIA; SUELEN VANZETTO.....	116
<b>CINZAS POZOLÂNICAS PRODUZIDAS COM LIXIVIAÇÃO ÁCIDA DE BIOMASSAS</b> MÔNICA NUNES LEMOS; KRISTIAN VINCO XAVIER; CHARLES PRADO FERREIRA DE LIMA; GUILHERME CHAGAS CORDEIRO.....	132
<b>ESTUDO DE CINZAS VOLANTES DE ALTA TEMPERATURA E DE LEITO FLUIDIZADO VISANDO A PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A BASE DE CIMENTO</b> CARINE DE SOUZA GONÇALVES; CAMILA APARECIDA ABELHA ROCHA; EDUARDO DE MORAES REGO FAIRBAIRN.....	143

<b>MAPEAMENTO DA CADEIA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM FORTALEZA</b> DENISE LEAL; VANESSA CAMPOS.....	158
<b>INFLUÊNCIA DA CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA</b> RAFAEL ALMEIDA SANTANA, HENRIQUE ALMEIDA SANTANA, CLEIDSON CARNEIRO GUIMARÃES.....	174
<b>AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO NATURAL NA PRODUÇÃO DE CONCRETO ESTRUTURAL</b> MARIA FRANCIELLE SANTOS MENEZES; ANGELA TERESA COSTA SALES.....	185
<b>ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM AGREGADO DE RCD</b> LIMA, R. S. B.; TAVARES, M. E. N.; BENTO, R. S. ....	197
<b>ANÁLISE DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS</b> GABRIEL SCHAAN CHIELE; JULIANA GIAZZON CAVALLI; MAIRA MACHADO VOGT; MORGANE BIGOLIN; ANGELA GAIO GRAEFF; LUIZ CARLOS PINTO DA SILVA FILHO.....	214
<b>ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE AREIA INDUSTRIAL EM SUBSTITUIÇÃO À AREIA NATURAL PARA A CONFECÇÃO DE ARGAMASSAS PARA ALVENARIA ESTRUTURAL CERÂMICA</b> ELOISE GUZZO; PAULO ROBERTO DUTRA; GILSON FRANCISCO PAZ SOARES.....	228
<b>PAREDES DE CONCRETO: ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS</b> ALESSANDRA ZALESKI, DRIELLY MENOSSO, GABRIEL LUIS DALLA VECHIA, SUELEN VANZETTO AND CRISTINA VITORINO DA SILVA.....	239
<b>REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO</b> DOUGLAS DUTRA MACIEIRA; JOÃO PAULO CAMPELO GOMES; GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA.....	255
<b>UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO NO CONCRETO: LACUNAS NO CONHECIMENTO</b> KUELSON RÂNDELLO DANTAS MACIEL; MARIANA DA PENHA NOVAES; ELILMA PEREIRA ALVES TEODORO; JOÃO LUIZ CALMON.....	266
<b>UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO NO CONCRETO: LACUNAS NO CONHECIMENTO</b> VICTOR ANTUNES SILVA BARBOSA; LUCAS LIMA COSTA; MATHEUS GOMES MARTINS; JOÃO LUIZ CALMON.....	282
<b>ESTUDO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM ARGAMASSAS</b> RAYLANE DE SOUZA CASTOLDI; SAYONARA MARIA MORAES PINHEIRO.....	297
<b>RCD COMO AGREGADO RECICLADO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL</b> BÁRBARA KONZEN; FLAVIO HARA; SOFIA A. L. BESSA.....	314
<b>CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE GESSO DE DEMOLIÇÃO DO MUNICÍPIO DE TUCURUÍ-PA</b> ÂNGELA MARIA ALMEIDA COSTA; RUTHE NOEMIA CORRÊA DOS REIS; GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA.....	325
<b>ESTUDO DA LAMA VERMELHA COMO FÍLER EM MATRIZES CIMENTÍCIAS</b> MAXWELL K. DEGEN; THIAGO C. CARDOSO; RAYARA P. COSTA; ÂNGELA B. MASUERO; DENISE C. C. DAL MOLIN.....	340

<b>CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOLONHA VISANDO SEU REAPROVEITAMENTO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO</b>	
ISABELLA PARRIÃO DE FREITAS MILHOMEM FERNANDES; JOÃO VICTOR RODRIGUES SOARES; WALÉRIA CARVALHO WANZELER; WALLYSON SANTOS MARTINS; BRUNA BAIA DA CUNHA.....	357
<b>INFLUÊNCIA DAS FIBRAS RECICLADAS DE PET COMO REFORÇO DE ADOBE</b>	
GUSTAVO RODRIGUES LOPES TAVARES; MARGARETH DA SILVA MAGALHÃES.....	371
<b>ANÁLISE DOS EFEITOS DA TEMPERATURA NO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOLONHA (BELÉM, PA)</b>	
J.V.R., SOARES; W.S., MARTINS; I.P., FREITAS; W, WANZELER.....	385
<b>ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES E RESÍDUOS</b>	
MUNIQUE FANTE; DAVID BRANDÃO NUNES; LAÍS VIEIRA DE SOUZA; MARLOVA PIVA KULAKOWSKI; FRANCISCO MANOEL WOHRNATH TOGNOLI.....	400
<b>ELEMENTOS TUBULARES DE PAPEL RECICLADO UTILIZADOS COMO ELEMENTO CONSTRUTIVO: UMA POSSIBILIDADE VIÁVEL DE USO DOS RESÍDUOS EM TERMOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL</b>	
NATHALIA SCHIMIDT DIAS; BIANCA SANTOS CAMARGO; GERUSA DE CÁSSIA SALADO.....	413
<b>RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: LACUNAS NO CONHECIMENTO</b>	
MARCUS LOBO; MELISSA LAGO DE JESUS; JOÃO LUIZ CALMON.....	428
<b>GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) NA CIDADE DE TUCURUÍ-PA, BRASIL</b>	
DEBORA DE S. TORQUATO; EDUARDA S. FERNANDES; MELINA G. M. DE SOUSA; NEYLIANE M. DE O. ROCHA. GRAZIELLE T. DE SOUZA.....	443
<b>PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS RECICLADO DE CONCRETO POR DOIS PROCESSOS DE COMINUIÇÃO DISTINTOS</b>	
KARLISSON SILVA, IVA LIMA, ANDRESSA LIRA; PAULO GOMES.....	451
<b>PRODUÇÃO DE CLÍNQUER PORTLAND COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO PELLET NA FORMAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS</b>	
F. N. COSTA; C. M. R. DIAS; D. V. RIBEIRO.....	466
<b>COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO E TÉRMICO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU PARA USO EM FORROS DE EDIFICAÇÕES</b>	
ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE FREITAS; DOUGLAS SOUSA TOSTA; SAULO GÜTHS; ANA PAULA MILANI.....	481
<b>UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS</b>	
THOMAS SCHATZMAYR WELP SÁ; ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO; SANDRA ODA; VIVIAN KARLA CASTELO BRANCO LOUBACK MACHADO BALTHAR.....	495
<b>AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA PARA SELEÇÃO DE MATÉRIAS MATÉRIAS-PRIMAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS PARTICULADOS</b>	
LETÍCIA MISSIATTO GAVIOLI; CRISTIANE BUENO; JOÃO ADRIANO ROSSIGNOLO.....	510
<b>DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA GRANDE VITÓRIA – ESPÍRITO SANTO</b>	
BRUNA SUBTIL LIMA; KARINA DE OLIVEIRA NASCIMENTO; SAILE TOMAZELLI; SAYONARA MARIA DE MORAES PINHEIRO.....	525
<b>UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICA E DE FLAMABILIDADE</b>	
CARVALHO, P.R.C.; ALENCAR, K.C.; BARBOSA, K.S.L.; RODRIGUES, E.C.; COSTA, D.S.....	540

<b>ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO RESÍDUO DO PÓ DE GESSO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA RECICLAGEM E PRODUÇÃO DE PEÇAS DECORATIVAS</b> CRISTIAN S. NUNES, GESSICA C. ZAMBRANO, ÂNGELA MARIA A. COSTA, RUTHE C. REIS, ALESON M. QUARESMA.....	553
<b>ESTADO DA ARTE DO USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO EM PAVIMENTOS</b> THOMAS SCHATZMAYR WELP SÁ; ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO; SANDRA ODA; VIVIAN KARLA CASTELO BRANCO LOUBACK MACHADO BALTHAR.....	563
<b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM ARGILAS CALCINADAS PASSÍVEIS DE USO EM LC<sup>3</sup></b> DANIELI, SARAH; SILVA, MICAEL RUBENS CARDOSO DA; MALACARNE, CAMILA SALVI; MACIEL, VINÍCIUS GONÇALVES; KIRCHHEIM, ANA PAULA.....	578
<b>INDICADORES DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS: COMPARATIVOS A NÍVEL MUNDIAL, BRASIL E PORTUGAL E ENTRE DUAS UNIVERSIDADES DESTES PAÍSES</b> FABIANA ROSA; ANDREA KERN; LUÍS BRAGANÇA.....	593
<b>ARGAMASSA CONTENDO ÓXIDO DE FERRO MAGNÉTICO RECUPERADO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS PARA USO EM BLINDAGENS DE RADIAÇÃO</b> DEUANDER O. MELLO; GABRIELA O. ORLANDO; RODRIGO A. SILVA; RICHARD T. LERMEN; DJALMO D. S. NETO; ROGERIO FERREIRA JUNIOR.....	605
<b>PERMEABILIDADE E MICROSCOPIA DE CONCRETOS COM RESÍDUO DE CORTE DE MARMORE E GRANITO COMO FILLER</b> LUCAS DE SOUSA FARIAS GESTA; CAIO QUARESMA SANTOS; PAULO SÉRGIO LIMA SOUZA.....	616
<b>PRODUÇÃO DE ARGAMASSA AUTONIVELANTE COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇUCAR</b> GUSTAVO CALZA; BRUNO MARANGONI; GABRIEL DALLA VECHIA; GABRIELA CARON; SUELEN VANZETTO.....	629
<b>INFLUÊNCIA DO USO DO JIGUE À ÁGUA NAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE RCD</b> LUCIANA VANNI FRANTZ; IAGO LOPES DOS SANTOS; ANGELA BORGES MASUERO.....	640
<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À FLEXÃO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO-CIMENTÍCIO-POLIMÉRICO À BASE DE CIMENTO PORTLAND E GRÃOS RECICLADOS AGLUTINADOS DE POLIPROPILENO</b> COELHO, RIVALDO TEODORO; DUCATTI, VITOR ANTONIO; SALADO, GERUSA DE CÁSSIA.....	651
<b>PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO DE CASCA DE MEXILHÃO</b> LUIZ FELIPE LIMA BRAGA LATA; CAMILA APARECIDA ABELHA ROCHA.....	666
<b>ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DO USO DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS E MÉTODOS DE MISTURA MODIFICADOS EM CONCRETOS DE AGREGADOS RECICLADOS</b> GUILHERME VICTOR DE OLIVEIRA ALVES; FLÁVIA SPITALE JACQUES POGGIALI; ROGÉRIO CABRAL DE AZEVEDO.....	678
<b>RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: APLICAÇÃO DOS INDICADORES DA NBR ISO 37120 – DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL EM COMUNIDADES PARA A CIDADE DE CUIABÁ-MT</b> MARCELO MARTINS DA CRUZ NETO; IVAN JULIO APOLONIO CALLEJAS; EMELI LALESCA APARECIDA DA GUARDA; LUCIANE CLEONICE DURANTE.....	694
<b>AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO USO DE AREIA DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM DOSAGENS DE SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL</b> SOUZA, B.G; CALLEJAS, I.J.A; SIMIONE, F.C; DURANTE. L.C.....	704

<b>ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO</b> ALVES, BRENDA; VAZ, CAMILA; MORAES, ELIZETE; BERNARDO, KAREN; SOUZA, GRAZIELLE.....	720
<b>INFLUÊNCIA DA DIATOMITA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO</b> ANA AMÉLIA MOTA DOS SANTOS; LÍVIA PEDRA PESSANHA; GUILHERME CHAGAS CORDEIRO.....	735
<b>DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM PAVIMENTO FLEXÍVEL</b> CARLOS EDUARDO DE LIMA; ENIO FERNANDES AMORIM; HUDSON DA SILVA OLIVEIRA; LUCAS FERNANDES DE MOURA; VALÉRIA GOMES ÁLVARES PEREIRA.....	744
<b>ANÁLISE DA CADEIA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL DE FORTALEZA</b> DENISE ALVES LEAL; VANESSA RIBEIRO CAMPOS.....	758
<b>TRATAMENTO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> VANESSA OERLE KAUTZMANN; MONIQUE PALAVRO LUNARDI; REGINA CELIA ESPINOSA MODOLO; CLÁUDIO DE SOUZA KAZMIERCZAK; MARLOVA PIVA KULAKOWSKI.....	769



## **EFEITO DO USO DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO ENDURECIDO**

**Thiago Mendes Leal da Silva** <sup>(1)</sup>; **Monalisa Renata Pinheiro Chaves** <sup>(2)</sup>;  
**Wellington Rodrigo Chagas Lima** <sup>(3)</sup>

(1) Universidade Federal do Pará – tmendes.leal@gmail.com; (2) Universidade Federal do Pará – engcivil.mrpc@gmail.com; (3) Universidade Federal do Pará – wellington25lima@gmail.com

### **RESUMO**

O setor da construção civil é de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer país, influenciando de forma direta em seu aspecto socioeconômico. Porém, mais recentemente, surge no cenário mundial uma preocupação no que diz respeito à quantidade e à destinação dos resíduos gerados por este setor, entre eles, os oriundos da demolição do concreto. A proposta deste trabalho é avaliar o efeito do uso de AGRC (agregados graúdos reciclados de concreto) com taxas de incorporação de 0%, 30% e 100% na produção de concretos para fins estruturais, e verificar o quanto este fator influencia em suas propriedades mecânicas, buscando desta forma alternativas viáveis do ponto de vista ambiental e econômico, sem comprometer o desempenho no concreto no estado endurecido. Para a avaliação dessas propriedades, foram realizados os seguintes ensaios: compressão axial; módulo de elasticidade; e tração por compressão diametral. Foi verificado também o comportamento das deformações dos corpos de prova ao longo de cada ensaio, com o auxílio de extensômetros fixados aos mesmos, juntamente com um sistema de aquisição de dados. Os resultados obtidos com o uso do AGRC mostram um ótimo desempenho.

**Palavras-chave:** agregado graúdo reciclado de concreto; concreto; deformações; propriedades mecânicas.

## **EFFECT OF THE USE OF RECYCLED CONCRETE COARSE AGGREGATES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HARDENED CONCRETE**

### **ABSTRACT**

The construction sector is of fundamental importance for the development of any country, directly influencing its socioeconomic aspect. However, more recently, there is a preoccupation in the world scenario about the quantity and destination of waste generated by this sector, including those from the concrete demolition. The purpose of this work is to evaluate the effect of the use of AGRC (recycled concrete coarse aggregates) with incorporation rates of 0% and 30% and 100% in the concrete production for structural purposes, and to verify how much this factor influences their mechanical properties, seeking this way viable alternatives from the environmental and economic point of view, without compromising the concrete performance in the hardened state. For evaluation of these properties, the following tests were performed: axial compression; modulus of elasticity; diametral compression traction. It was also verified the deformations behavior of the specimens along each test, with aid of extensometers connected to them, together with a data acquisition system. The results obtained with the use of the AGRC show a great performance.

**Key-words:** recycled concrete coarse aggregates; concrete; deformations; mechanical properties.



## 1. INTRODUÇÃO

Na Engenharia Civil, a utilização de RCD (Resíduos de Construção e Demolição) como agregados para concretos e argamassas tem sido foco de diversos estudos, visando tanto questões ambientais, quanto econômicas. Segundo Hamad e Dawi (2017)<sup>(1)</sup>, como o concreto convencional é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, existe uma grande preocupação com relação à futura escassez dos recursos naturais que compõem este material, e também com um destino mais adequado para os resíduos de concreto gerados, principalmente, através de demolições.

No ano de 2002, no Brasil, foi homologada a resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 307<sup>(2)</sup>, onde se define que grandes geradores dos setores públicos e privados passam a ser obrigados a desenvolver e a implementar um plano de gestão dos resíduos de construção e demolição, visando a sua reutilização, reciclagem ou destinação ambientalmente correta.

No mundo, a indústria da construção civil utiliza cerca de 20 bilhões de toneladas de agregados (grãos e miúdos), 1,5 bilhão de toneladas de cimento e 800 milhões de toneladas de água por ano (Kubissa *et al.*; 2015)<sup>(3)</sup>. Segundo McGinnis *et al.* (2017)<sup>(4)</sup>, os impactos ambientais negativos gerados com a utilização de agregados reciclados reduzem pela metade quando comparados com o uso de agregados de origem natural.

De acordo com Buttler (2003)<sup>(5)</sup>, dentre os inúmeros tipos de resíduos gerados pela construção civil, os oriundos do concreto mostram um bom potencial de utilização como agregados, devido ao seu menor grau de contaminação por outros materiais, quando comparados a outros resíduos da construção.

Estudos realizados pelos autores Etxeberria *et al.* (2007)<sup>(6)</sup>, Hui-Sheng *et al.* (2009)<sup>(7)</sup> e Pandurangan *et al.* (2016)<sup>(8)</sup> mostraram que a incorporação de AGRC (Agregados Grãos Reciclados de Concreto) na produção de novos concretos para fins estruturais pode sim gerar resultados satisfatórios no que diz respeito às propriedades mecânicas (resistências à compressão, à tração e módulo de elasticidade).

Este estudo busca avaliar as propriedades mecânicas de concretos para fins estruturais com diferentes taxas de substituição de agregados grãos naturais por AGRC (de 0%, 30% e 100%) através de ensaios de resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade. E também



comparar o comportamento dos gráficos de tensão-deformação obtidos experimentalmente com o que é estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) <sup>(9)</sup>.

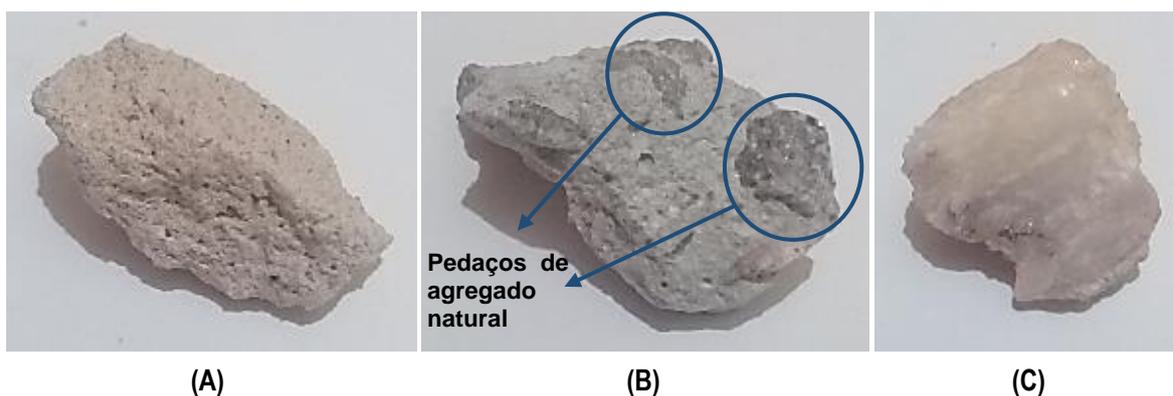
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)

A NBR 9935 (ABNT, 2011) <sup>(10)</sup> define o agregado reciclado de concreto como o material granular obtido por reciclagem de resíduos de concreto fresco ou endurecido, constituído na sua fração graúda (partículas com diâmetro superior a 4,75mm) de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e/ou material pétreo com propriedades que atendam à NBR 15116 (ABNT, 2004) <sup>(11)</sup>.

Segundo Akbarnezhad *et al.* (2011) <sup>(12)</sup>, dependendo do tamanho, os AGRC podem possuir um ou mais pedaços de agregados graúdos naturais, cercados completa ou parcialmente por uma camada de argamassa, ou podem ser essencialmente constituídos por argamassa com diferentes proporções de agregados naturais de tamanho menor embutidos. E em alguns casos, a presença de argamassa aderida à superfície do agregado natural é mínima, situação essa que mais se aproxima do ideal. A figura a seguir mostra essa variabilidade:

Figura 1 - (A) composto basicamente por argamassa; (B) pedaços de agregado natural envoltos por argamassa; (C) predominantemente natural - com pouca argamassa aderida em sua superfície.





## 2.2. Propriedades mecânicas de concretos produzidos com AGRC

### 2.2.1. Resistência à compressão

A viabilidade técnica de reinserção do material reciclado como agregado na produção de novos concretos é foco de diversas pesquisas (Poon e Kou, 2010<sup>(13)</sup>; Limbachiya *et al.*, 2012<sup>(14)</sup>; Pandurangan *et al.*, 2016<sup>(15)</sup>), e um dos principais pontos abordados está relacionado à resistência à compressão de concretos com incorporação de AGRC. De acordo com esses autores, percebe-se que se a taxa de substituição de AGN (Agregado Graúdo Natural) por AGRC for de até 30% aproximadamente, existe muito pouca variação nas resistências à compressão obtidas pelos concretos.

Guerra *et al.* (2014)<sup>(16)</sup> mostram em seus estudos que as resistências à compressão de concretos convencionais superaram no mínimo em 10% as dos concretos compostos somente por AGRC. E essa diferença cai ainda mais quando comparadas a concretos com 20% e 50% de AGRC incorporado, ou seja, resistências praticamente equivalentes.

### 2.2.2. Módulo de elasticidade

De acordo com Silva *et al.* (2016)<sup>(17)</sup>, entre os diversos fatores que podem afetar o módulo de elasticidade de concretos com AGRC são: a taxa de substituição de agregados graúdos naturais por AGRC; as dimensões dos agregados e sua procedência, que interferem diretamente na sua qualidade; procedimento de mistura no momento da preparação; condições de cura; utilização de aditivos; e a idade do concreto no momento do ensaio.

Dhir e Paine (2004)<sup>(18)</sup> mostram que há uma influência negativa nos valores de módulo de elasticidade à medida que as taxas de AGRC utilizados aumentam. Xiao *et al.* (2005)<sup>(19)</sup> aponta que quando o concreto é produzido com AGRC apenas, o módulo de elasticidade tende a diminuir entre 20% e 40% quando comparado a concretos produzidos somente com AGN.

### 2.2.3. Resistência à tração

Etzeberria *et al.* (2007)<sup>(6)</sup> e Poon e Kou (2010)<sup>(13)</sup> relatam em seus estudos que o concreto com agregado reciclado apresentou melhor desempenho com relação ao concreto convencional no que diz respeito à resistência à tração. Esses autores mencionam que este ganho de resistência é



devido à capacidade de absorção de água dos restos de argamassa presentes no AGRC e seu aspecto rugoso que tendem a melhorar as zonas de transição interfaciais entre os agregados reciclados e a nova argamassa.

De acordo com Kubissa *et al.* (2015)<sup>(3)</sup>, concretos produzidos com AGRC atingem maiores resistências à tração quando comparados a concretos convencionais. Em estudos realizados por esses autores, as resistências apresentadas por concretos com taxas de 30% e 100% de AGRC chegaram a superar em até 12% as resistências dos concretos produzidos apenas com agregados graúdos naturais.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Caracterização dos materiais**

O cimento utilizado para a realização deste trabalho foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI). Para este material foi realizado o ensaio de massa específica, de acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2000)<sup>(20)</sup> e o valor encontrado foi de 3,09 g/cm<sup>3</sup>.

Já o agregado miúdo natural usado era de origem quartzosa, e os ensaios de caracterização feitos foram o de massa unitária (NBR NM 45, ABNT 2006)<sup>(21)</sup> e massa específica (NBR NM 52, ABNT 2009)<sup>(22)</sup>, onde foram encontrados respectivamente os resultados de 1,51 g/cm<sup>3</sup> e 2,61 g/cm<sup>3</sup>.

O agregado graúdo natural utilizado foi a brita 1 (variação granulométrica de 9,5mm a 19mm) de natureza granítica. Para o ensaio de massa unitária (NBR NM 45, ABNT 2006)<sup>(21)</sup> o resultado encontrado foi de 1,49 g/cm<sup>3</sup>, e para o de massa específica (NBR NM 53, ABNT 2009)<sup>(23)</sup>, de 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

O aditivo usado foi o superplastificante GLENIUM 51, que de acordo com o fabricante, deve ser utilizado nas dosagens de 0,2% a 1% da massa de cimento presente na mistura.

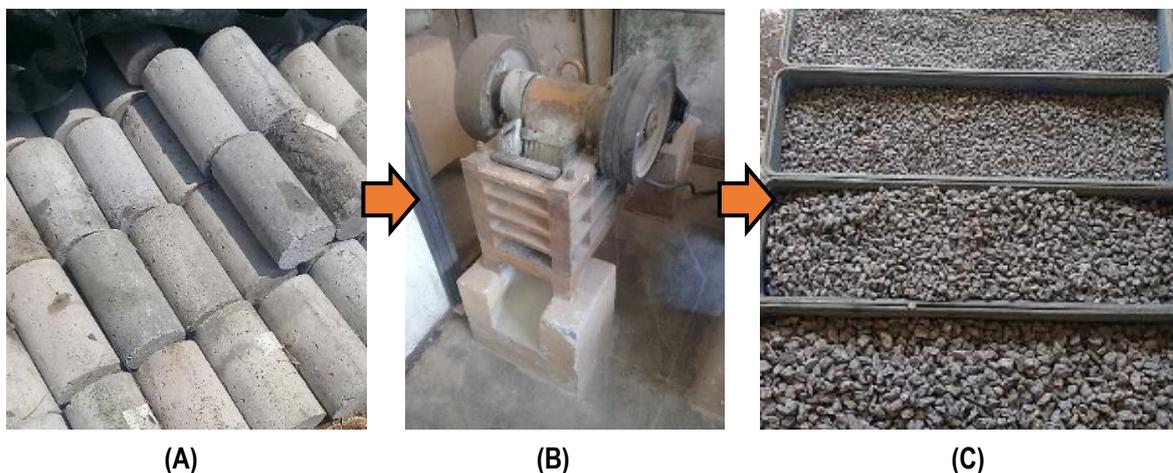
##### **3.1.1. Agregado graúdo reciclado de concreto**

O AGRC utilizado foi gerado através do processo de britagem (com o auxílio de um britador de mandíbula) de corpos de prova de concreto produzidos em laboratório e já descartados. Foi estabelecido como um critério base para a coleta dos espécimes que os mesmos tivessem sido produzidos com concreto convencional e suas resistências à compressão fossem igual ou maior que 25 MPa. Além de outros aspectos subjetivos, tais como: a qualidade estética; amostras não úmidas;



corpos de provas não destruídos. A figura 2 mostra parte do processo de manipulação deste material:

Figura 2 - (A) corpos de prova descartados; (B) britador de mandíbula utilizado na cominuição dos espécimes; (C) material britado (AGRC).



Os ensaios de caracterização realizados com os AGRC foram o de massa unitária (NBR NM 45, ABNT 2006)<sup>(21)</sup>, e para encontrar a massa específica foi utilizada uma metodologia apresentada por Leite *et al.* (2011)<sup>(24)</sup>, pois ainda não há prescrições normativas da ABNT para se determinar a massa específica do AGRC. Os resultados obtidos foram de 1,11 g/cm<sup>3</sup> para a massa unitária, e de 2,62 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica.

### 3.2. Produção do concreto

O método de dosagem utilizado neste trabalho foi o IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992)<sup>(25)</sup>. A dosagem do concreto visava um valor de Fck igual a 30 MPa para três traços com teores de substituição (de agregado graúdo natural por AGRC) diferentes: 0%; 30%; e 100%. Os traços utilizados para a produção dos concretos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 1 – Dosagens dos traços

Concretos	m	c	a	p		Cc (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	α (%)
				AGN	AGRC			
Traço 1 - 0% AGRC	5,3	1	2,21	3,09	0,00	342,47	0,59	
Traço 2 - 30% AGRC	5,1	1	2,11	2,09	0,90	349,88	0,60	51
Traço 3 - 100% AGRC	5,2	1	2,16	0,00	3,04	337,24	0,62	



O aditivo superplastificante foi utilizado para os traços 2 e 3 com a intenção de atingir uma boa trabalhabilidade no processo de mistura. As quantidades foram de 0,2% e 0,7% (da massa de cimento utilizada para cada traço), respectivamente.

O processo de moldagem, cura e desforma dos corpos de prova foram realizados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2003)<sup>(26)</sup>. Para cada concretagem foram moldados seis corpos de prova cilíndricos, onde: dois foram utilizados para o ensaio de compressão axial (NBR 5739, ABNT 2007)<sup>(27)</sup>; dois para o de módulo de elasticidade (NBR 8522, ABNT 2008)<sup>(28)</sup>; e dois para o de tração por compressão diametral (NBR 7222, ABNT 2011)<sup>(29)</sup>. Os ensaios foram realizados aos 56 dias de idade dos concretos.

Para a análise dos experimentos, foram considerados apenas os espécimes que atingiram os melhores resultados (potenciais). Esse método foi aplicado devido à quantidade de extensômetros disponíveis, o que acabou restringindo a quantidade de corpos de prova produzidos para a realização de cada ensaio.

### **3.3. Instrumentação dos corpos de prova**

Para realização dos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral, foi feita a instrumentação dos corpos de prova utilizando dois extensômetros elétricos de superfície para cada exemplar, no intuito de registrar suas deformações longitudinais e transversais, respectivamente. Já para os de módulo de elasticidade, foi usado um par de extensômetros do tipo “clip gage”, responsáveis por verificar as deformações longitudinais. Esse procedimento foi feito com a intenção de monitorar diversos intervalos de deformações no decorrer dos ensaios com o auxílio de um sistema de aquisição de dados.

Para a geração dos gráficos que serão apresentados na seção a seguir, foi considerada uma média simples entre as deformações registradas pelos dois extensômetros presentes em cada corpo de prova.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Compressão axial**

A tabela 2 mostra as resistências à compressão para cada traço e as deformações máximas registradas (momento da ruptura):

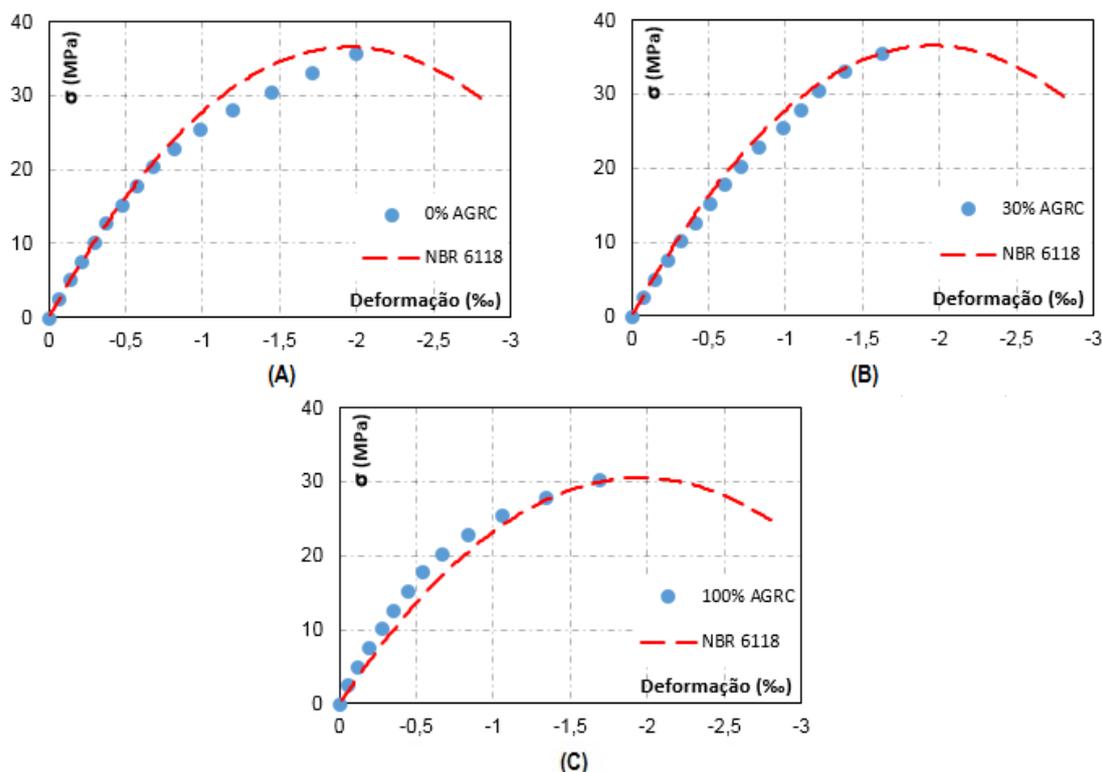


Tabela 2 – Resultados dos ensaios de compressão axial aos 56 dias

Concretos	Resistência à compressão - 56 dias (MPa)	Deformações máximas registradas - Ruptura (‰)
1 – 0% AGRC	35,9	1,988
2 – 30% AGRC	35,5	1,621
3 – 100% AGRC	30,4	1,686

Já a figura 3 mostra graficamente a relação tensão-deformação obtida durante os ensaios. O tracejado em vermelho representa um comportamento ideal para este ensaio, previsto na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup>. Isso foi feito com o intuito de comparar visualmente os resultados obtidos em laboratório com o que é apresentado pela norma.

Figura 3 - (A) 0% AGRC; (B) 30% AGRC; (C) 100% AGRC.



Pode-se notar que a relação entre os dados de tensão e deformação obtidos durante os ensaios apresenta uma ótima coerência com o que é apresentado na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup>. Para o espécime produzido somente com AGN, as deformações no momento da ruptura ficaram próximas de 2‰, o que também é previsto em norma. Os valores de deformação ficaram entre de 1,6‰ e



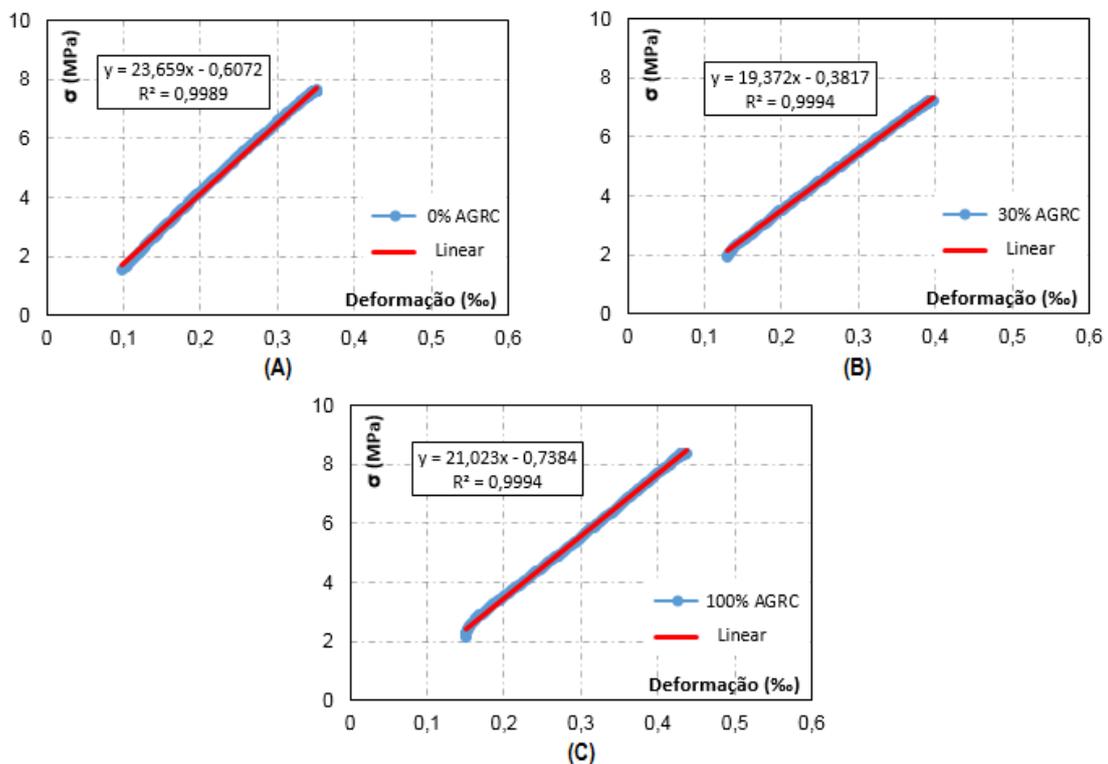
1,7‰ para os concretos com AGRC (30% e 100%), o que pode ser considerado satisfatório para este tipo de agregado.

A resistência apresentada pelo concreto com 30% de AGRC foi muito próxima a do concreto convencional. Isso evidencia uma concordância com estudos realizados autores Poon e Kou (2010)<sup>(13)</sup>, Limbachiya *et al.* (2012)<sup>(14)</sup> e Pandurangan *et al.* (2016)<sup>(15)</sup>, que mostram que a incorporação de até 30% de AGRC não compromete a resistência à compressão. Já o concreto com 100% de AGRC ficou com uma resistência em torno de 15% abaixo do concreto feito apenas com AGN, que indica uma variação próxima ao que Guerra *et al.* (2014)<sup>(16)</sup> mostram em suas pesquisas.

## 4.2. Módulo de elasticidade

A figura 4 revela os gráficos que relacionam a tensão e a deformação observadas durante o experimento. Como as tensões no corpo de prova neste ensaio são relativamente baixas, pode-se admitir um comportamento linear nos gráficos.

Figura 4 - (A) 0% AGRC; (B) 30% AGRC; (C) 100% AGRC.



Com os dados apresentados, foi calculado para cada corpo de prova o módulo de elasticidade tangente inicial, especificado na NBR 8522 (ABNT 2008)<sup>(28)</sup>. A tabela 3 mostra esses resultados:



Tabela 3 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade aos 56 dias

Concretos	Módulo de elasticidade - 56 dias (GPa)
1 – 0% AGRC	23,7
2 – 30% AGRC	19,7
3 – 100% AGRC	21,1

Os resultados encontrados para o concreto com 0% de AGRC foi superior aos demais, o que era previsto, já que Dhir e Paine (2004)<sup>(18)</sup> mostram em seus estudos que a incorporação de AGRC reduz os resultados nesse tipo de ensaio. Os mesmos autores justificam que tal fato pode ser explicado pelo maior módulo de elasticidade da brita granítica em comparação ao AGRC, o que reflete diretamente no módulo de elasticidade dos concretos produzidos com esses materiais.

Xiao *et al.* (2005)<sup>(19)</sup> aponta que concretos produzidos somente com AGRC, o módulo de elasticidade tende a diminuir entre 20% e 40% quando comparado a concretos convencionais, porém neste trabalho observa-se uma redução de apenas 11%, o que pode estar diretamente relacionado a boa qualidade dos corpos de prova coletados para produzir os AGRC utilizados neste trabalho.

### 4.3. Tração por compressão diametral

A tabela 4 apresenta as resistências à tração alcançadas por cada espécime, assim como, as deformações máximas registradas até o momento da ruptura:

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral aos 56 dias

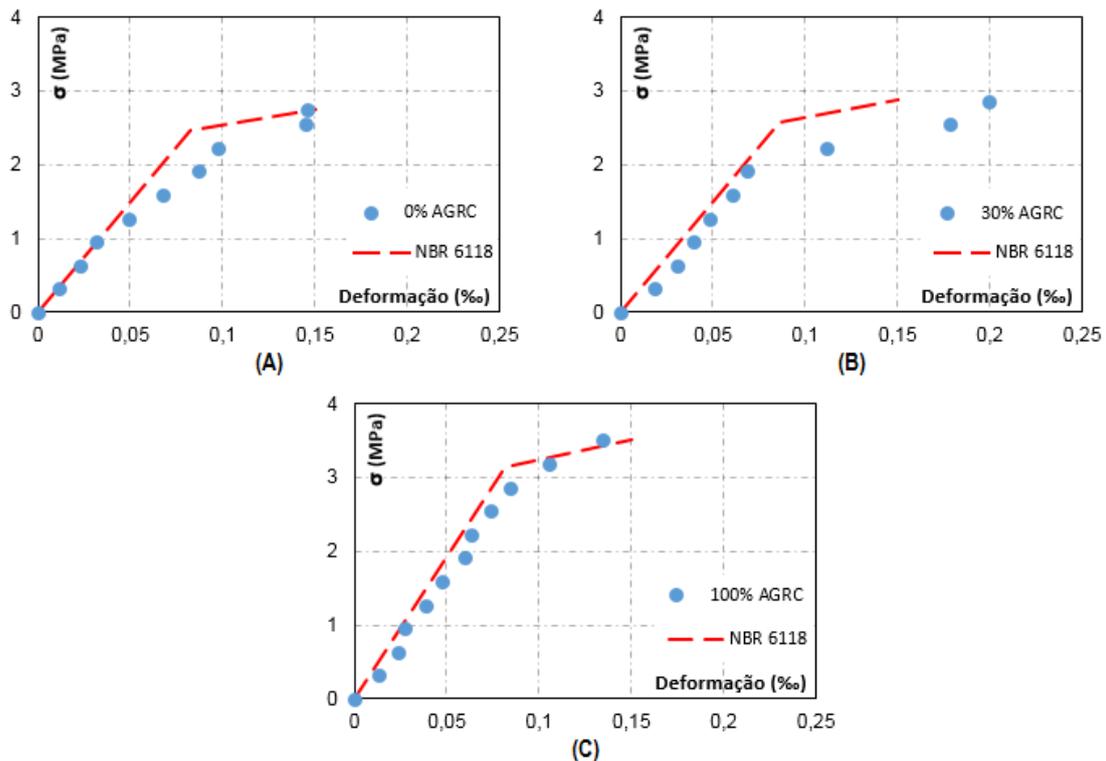
Concretos	Resistência à tração - 56 dias (MPa)	Deformações máximas registradas - Ruptura (‰)
1 – 0% AGRC	2,8	0,145
2 – 30% AGRC	2,9	0,199
3 – 100% AGRC	3,5	0,134

Através de gráficos, a figura 5 mostra os dados de tensão e deformação obtidos nos ensaios. A NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup> propõe, de maneira simplificada, um comportamento bilinear (tracejado em vermelho) para os gráficos de tensão-deformação neste método de ensaio. Assim como nos



ensaios de compressão, isso foi feito com a intenção de comparar os resultados dos ensaios com o que está presente na norma.

Figura 5 - (A) 0% AGRC; (B) 30% AGRC; (C) 100% AGRC.



Nos gráficos apresentados pode-se notar que existe uma concordância no comportamento dos resultados obtidos em laboratório com o modelo bilinear apresentado na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup>, considerando que a norma sugere uma representação ideal, os desvios observados se encontram dentro do esperado.

Observa-se que os concretos com 0% e 100% de AGRC apresentaram deformações bem próximas de 0,15‰ até o momento da ruptura, como é previsto na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup>. O concreto com 30% de AGRC apresentou uma deformação acima do previsto. Porém, deformações de até 0,2‰ ainda se encontra dentro dos parâmetros aceitáveis.

Houve um ganho de resistência à medida que as taxas de AGRC cresceram, com destaque para o concreto produzido somente com AGRC. Tal situação se encontra de acordo com o que Poon e Kou (2010)<sup>(13)</sup> e Kubissa *et al.* (2015)<sup>(3)</sup> apresentaram em seus estudos, onde as resistências à tração de concretos com agregados reciclados foram superiores as do concreto convencional.



## 5. CONCLUSÕES

Percebe-se no presente trabalho que o desempenho dos concretos produzidos com AGRC foi satisfatório no que se refere às propriedades mecânicas e também às deformações, mesmo utilizando como parâmetros o que está na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup>, que ainda não considera a utilização de AGRC, fato esse que deve mudar em breve. Sendo assim, os objetivos citados inicialmente foram atingidos.

Os resultados dos ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral realizados neste estudo mostraram uma coerência com trabalhos desenvolvidos por diversos pesquisadores citados, com algumas oscilações, já que o AGRC é um material bastante heterogêneo, que pode ter como origem diversos tipos de concretos com as mais variadas finalidades.

Quanto às deformações registradas, elas se apresentaram bem coerentes com o que é observado na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup>. Logo, pode-se notar que com relação às deformações, concretos com AGRC têm um comportamento similar aos concretos convencionais, o que traz a possibilidade de aplicação do que é apresentado na NBR 6118 (ABNT, 2014)<sup>(9)</sup> também para concretos com a incorporação de AGRC, após passar pelas devidas adaptações.

Este estudo também busca, entre outras coisas, ampliar o conhecimento sobre os agregados graúdos reciclados de concreto e o quanto eles influenciam nas propriedades mecânicas do concreto endurecido e, principalmente, no que diz respeito às suas deformações, que exigem um cuidado maior para serem monitoradas. Nesta pesquisa, o AGRC mostrou que tem um potencial real na indústria da construção civil em uma maior escala, na produção de concretos com as mais variadas finalidades, entre elas, a estrutural.



## 6. REFERÊNCIAS

1. HAMAD, B. S.; DAWI, A. H., Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, Vol. 7, p. 228-239, 2017.
2. CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução 01/1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 20 de abril de 2019.
3. KUBISSA, W.; JANKULSKI, R.; KOPER, A.; SZPETULSKI, J., Properties of concretes with natural aggregate improved by RCA addition. **Procedia Engineering**, Vol. 108, p. 30-38, 2015.
4. MCGINNIS, M. J.; DAVIS, M.; DE LA ROSA; A.; WELDON, B. D.; KURAMA, Y. C., Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 69, p. 1203-1211, 2017.
5. BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
6. ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 37, p. 735-742, 2007.
7. HUI-SHENG, S.; BI-WAN, X.; XIAO-CHEN, Z., Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Vol. 23, p. 1980-1985, 2009.
8. PANDURANGAN, K.; DAYANITHY, A.; OM PRAKASH, S., Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, Vol. 120, p. 212-221, 2016.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologias. Rio de Janeiro, 2011.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
12. AKBARNEZHAD, A.; ONG, K. C. G.; ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; FOO, T. W. J., Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, Vol. 25, p. 3469-3479, 2011.
13. POON, C.; KOU, S. Effects of fly ash on mechanical properties of 10-years-old concrete prepared with recycled concrete aggregates. In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Waste Engineering Management (ICWEM), 2010, Shanghai, China: RILEM Publications SARL, 2010, p. 46-59.
14. LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y., Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, Vol. 27, p. 439-449, 2012.



15. PANDURANGAN, K.; DAYANITHY, A.; OM PRAKASH, S., Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, Vol. 120, p. 212-221, 2016.
16. GUERRA, M.; CEIA, F.; de BRITO, J.; JÚLIO, E., Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, Vol. 72, p. 113-123, 2014.
17. SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, R. K., Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 112, p. 2171-2186, 2016.
18. DHIR, R. K.; PAINE, K. A. Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete. In: 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Construction: Waste Management, 2004, Singapore: 2004, p. 108-123.
19. XIAO, J. Z.; LI, J.; ZHANG, C., Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, p. 1187-1194, 2005.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregado - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. Rio de Janeiro, 2006.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
24. LEITE, M. B.; CORDEIRO, L. N. P.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Proposta de adaptação do procedimento proposto por Leite (2001) para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduo de construção demolição. In: Congresso Internacional Sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 7<sup>o</sup>, 2011, Fortaleza: Anais CINPAR, 2011.
25. HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992, 349p.
26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.
29. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.



## AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE BIOCONCRETOS DE BAMBU

**Lucas Caldas (1); Vanessa Andreola (1); Romildo Toledo Filho (1)**

(1) Universidade Federal do Rio de Janeiro - lrc.ambiental@gmail.com

### RESUMO

Bioconcretos de bambu (BCB) apresentam potencial para a reutilização dos resíduos gerados no processamento primário de produtos de bambu. Contudo, os agregados de bambu precisam ser tratados previamente antes de serem misturados aos materiais cimentícios. Nesse tipo de processo, além do consumo de energia para o tratamento dos resíduos, também é empregado o aditivo químico acelerador de pega denominado cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), que contribui para o aumento dos impactos ambientais durante a produção dos BCB. Foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida Dinâmica (ACVd), com escopo do berço ao portão, para a avaliação de diferentes misturas de BCB produzidas em laboratório. Os teores analisados de  $\text{CaCl}_2$  foram 1, 2, 3, 4 e 5% (em relação à massa de cimento Portland). A modelagem ambiental foi realizada no SimaPro, com banco de dados do Ecoinvent, Declarações Ambientais de Produtos e coletados em laboratório. Como indicadores de ecoeficiência foram relacionados os potenciais de impactos ambientais com a resistência à compressão dos BCB (em MPa). A mistura com 2% de  $\text{CaCl}_2$  apresentou o melhor resultado para a maioria dos casos. A utilização da ACV foi fundamental para conhecer a produção dos bioconcretos e otimização do desempenho mecânico e ambiental.

**Palavras-chave:** Bioconcretos de bambu, ACV Dinâmica, cloreto de cálcio, tratamento resíduos.

## ECO-EFFICIENCY INDICATORS ASSESSMENT IN THE PRODUCTION OF BAMBOO BIO-CONCRETES

### ABSTRACT

Bamboo bio-concretes (BBC) can be considered as an alternative for the reuse of waste generated during bamboo products primary process. However, the bamboo aggregates need to be treated in order to be mixed with cementitious materials. Besides the energy consumption for the bamboo waste treatment is used the setting accelerator additive of calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ), that increase the environmental impacts of BBC production. The Life Cycle Assessment (LCA) was used, considering a cradle to gate scope, for the evaluation of different mixtures produced in laboratory. Five BBC mixtures were evaluated with different  $\text{CaCl}_2$  content: 1%, 2%, 3%, 4% e 5% (in relation to the Portland cement mass). The environmental modelling was performed in SimaPro and we use the Ecoinvent database, Environmental Product Declarations and primary data collected in the laboratory. As ecoefficiency indicators we related the potential environmental impacts with the BBC compressive strength results (in MPa). The mixture with 2% content of  $\text{CaCl}_2$  presented the best results for most of cases. The use of LCA was fundamental to know the production of bio-concretes and optimization of mechanical and environmental performance..

**Key-words:** Bamboo bio-concrete, Dynamic LCA, calcium chloride, waste treatment.



## 1. INTRODUÇÃO

A busca por um desenvolvimento sustentável em consonância com os preceitos de uma bioeconomia circular deve ser um dos nortes para o desenvolvimento de novos materiais no setor da construção civil. A bioeconomia está fundamentada no uso de recursos de origem biológica, principalmente de origem vegetal, com as seguintes vantagens: absorção de CO<sub>2</sub> atmosférico, são produtos renováveis, com potencial de serem biodregadáveis, e, normalmente com um processo produtivo menos intenso e menos poluente, quando comparados a produtos inorgânicos <sup>(1)</sup>. Já a economia circular, que também tem sido pauta de discussão de diversos setores industriais, traz a importância de priorizar a reutilização e reciclagem de resíduos e a economia de recursos naturais, de uma forma integrada, colaborativa e inteligente <sup>(2)</sup>. A integração entre esses dois “pensamentos” dá a origem a chamada bioeconomia circular.

A indústria da construção é conhecida por conseguir aproveitar os resíduos oriundos de diferentes e principalmente dos processos primários industriais, destacando-se: a produção de cimento Portland, com o aproveitamento de cinza volante e escórias de alto forno, uma prática já consolidada no mercado brasileiro e mundial; desenvolvimento de concretos com o uso de agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição <sup>(3)</sup>; cinzas de diversas indústrias e setores, como casca de arroz e bagaço de cana <sup>(4)</sup>; resíduos sólidos urbanos <sup>(5)</sup>. Grande parte das pesquisas destacam-se no desenvolvimento e avaliações de concretos, normalmente para fins estruturais <sup>(6)</sup>.

Andreola <sup>(7)</sup> desenvolveu o bioconcreto de bambu (BCB) com o objetivo de aproveitar os resíduos provenientes da cadeia produtiva de bambu, misturados com cimento Portland, aditivos químicos e água. O material desenvolvido permite que ele seja auto-adensado ao invés de prensado (que normalmente é o processo mais utilizado para a produção de bio-concretos, resultando em custos elevados de energia) e resulta em um material leve, com baixa condutividade térmica e potencial de ser utilizado em fechamentos verticais de edificações, resultando em eficiência energética e térmica.

Quando resíduos vegetais são utilizados como agregados e misturados com materiais cimentícios, muitas pesquisas apontam que eles podem atrapalhar o processo de pega, devido à presença de extrativos orgânicos <sup>(8)</sup>. Para sanar ou amenizar esse problema, normalmente é necessário que os resíduos sejam pré-lavados em água aquecida (em torno de 80°C). Nesse processo há elevado consumo de água, energia para aquecimento e uso de equipamentos específicos. Outra alternativa



indicada é o uso de aditivos aceleradores de pega, como o Cloreto de Cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) <sup>(9)</sup>. Os compostos químicos auxiliam para acelerar a hidratação do cimento antes dos extrativos atuarem e prejudicarem a mistura. Dessa forma, impactos ambientais são gerados durante essa etapa de tratamento, e, portanto, precisam ser contabilizados e avaliados para conhecer o impacto ambiental de cada produto durante a produção dos bioconcretos.

Para a obtenção de informações ambientais de produtos de construção a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que vem sendo largamente utilizada internacionalmente e nos últimos anos, com crescimento expressivo no Brasil. A partir da ACV é possível quantificar as entradas (consumo de recursos naturais, energia, etc.) e saídas (emissões, efluentes, resíduos etc.) durante o processo de produção de um bem ou serviço, e avaliar isso em forma de potenciais impactos ambientais <sup>(10)</sup>.

Com base no contexto supracitado, o presente estudo teve como objetivo avaliar os potenciais impactos ambientais durante o tratamento dos resíduos de bambu utilizados em diferentes misturas de BCB produzidas em laboratório, com o uso de diferentes teores de  $\text{CaCl}_2$ .



## 2. MÉTODO

### 2.1. Caracterização dos bioconcretos de bambu

O BCB é formado pela mistura de partículas de bambu com cimento Portland e aditivos químicos, onde todas as matérias-primas são homogeneizadas com água (Figura 1). Neste artigo, foram avaliadas cinco misturas de BCB com diferentes porcentagens de cloreto de cálcio, onde o consumo de cada material por kg/m<sup>3</sup> está especificado na Tabela 1.

Figura 1 – Bioconcreto de bambu.



Tabela 1 – Caracterização dos bioconcretos avaliados.

% de CaCl <sub>2</sub>	Cimento – CPV-ARI	Partículas de bambu	Cloreto de Cálcio	Água	Resistência à compressão
1%	828,6	236,0	8,3	522,8	13,28
2%	828,6	236,0	16,6	522,8	13,95
3%	828,6	236,0	24,9	522,8	14,33
4%	828,6	236,0	33,1	522,8	14,48
5%	828,6	236,0	41,4	522,8	14,77



## 2.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

No presente estudo foi utilizada a metodologia de ACV. De acordo com NBR ISO 14040<sup>(10)</sup> ela é dividida em quatro etapas: (1) definição de objetivo e escopo, (2) inventário do ciclo de vida, (3) avaliação do impacto do ciclo de vida e (4) interpretação dos resultados. Essas etapas serão apresentadas a seguir. O presente estudo foi realizado conforme a NBR ISO 14040<sup>(10)</sup> e EN 15978<sup>(11)</sup>, sendo que essa última traz diretrizes e recomendação para a ACV de produtos da construção civil. Foram utilizadas duas abordagens: ACV convencional e ACV dinâmica (ACVd).

### 2.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida Dinâmica (ACVd)

A ACVd proposta por Levasseur et al.<sup>(12)</sup> utiliza fatores de caracterização dinâmicos, ou seja, que variam ao longo do tempo. O modelo de cálculo considera o impacto de aquecimento global instantâneo ( $GWI_{inst}$ ) e cumulativo ( $GWI_{cum}$ ), que são baseados na combinação de fatores de caracterização dinâmicos flexíveis (DCF), que contabiliza o caimento de diferentes gases de efeito estufa (GHG) ao longo tempo, a partir de um inventário dinâmico, considerando as emissões dos GHG ao longo do tempo. Nas equações A, B e C são apresentadas as formulações utilizadas no modelo.

$$DCF_{inst;GHG}(t) = \int_{t-1}^1 \alpha_{GHG} C(t)_{GHG} dt \quad (A)$$

$$GWI_{inst}(t) = \sum GHG \sum_{i=0}^t g_{GHG}(t_i) \cdot DCF_{inst,GHG}(t - t_i) \quad (B)$$

$$GWI_{cum}(t) = \sum_{i=0}^t GWI_{inst}(t_i) \quad (C)$$

Onde:

$DCF_{inst;GHG}(t)$  – fator dinâmico de caracterização de um específico gás de efeito estufa que ocorre no tempo t.

$C(t)_{GHG}$  – carga na atmosfera do dado gás de efeito estufa t anos após a sua emissão.

$\alpha_{GHG}$  – forçamento radioativo instantâneo por unidade de massa que aumentou na atmosfera para um específico gás de efeito estufa

$GWI_{inst}(t)$  – Impacto instantâneo de aquecimento global em um dado tempo t.

$g_{GHG}(t_i)$  – é o resultado do inventário dinâmico do dado gás de efeito estufa no ano i.



$GWI_{cum}(t)$  – Impacto cumulativo de aquecimento global - é a somatória de todos os  $GWI_{inst}(t)$  do zero ao tempo  $t$ .

Para a avaliação de biomateriais, em que a quantificação do CO<sub>2</sub> biogênico ao longo do tempo, é um aspecto crítico, como mostra Peñaloza et al. <sup>(13)</sup>, a ACVd tende a ser um método mais preciso e completo para avaliação desses materiais e por isto foi empregado no presente estudo. Foram avaliados quatro GHG, sendo eles: o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e monóxido de carbono (CO).

A contabilização do carbono biogênico exerce grande influência do fim de vida que o material irá receber. Por exemplo, para o caso de incineração, esse carbono acaba sendo igual a zero, pois o carbono que é absorvido na fotossíntese é devolvido quando o mesmo é queimado. Por outro lado, para o caso de aterramento sanitário, dependendo da constituição da biomassa ou da interação com outros materiais constituintes, esse carbono pode ser considerado indefinidamente armazenado <sup>(14)</sup>. Como os resíduos de bambu presentes no bio-concreto são mineralizados pelo cimento, foi considerado que o carbono biogênico fica indefinidamente armazenado, essa mesma abordagem foi adotada por Arrigoni et al. <sup>(15)</sup> e Pittau et al. <sup>(16)</sup>.

Para a categoria de Potencial de Aquecimento Global (GWP100) foi calculado o carbono biogênico, absorvido durante a fotossíntese do bambu. Para isso foi quantificado o teor de carbono do material seco (C) via Análise Elementar CHN, em que é possível quantificar o percentual de carbono presente na matéria seca. O ensaio foi realizado no Laboratório de Xistoquímica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Para os resíduos de bambu foi utilizado o valor de 45,1%.

### 2.2.2. Definição da unidade funcional e escopo

A unidade funcional escolhida foi o volume de BCB produzido (em m<sup>3</sup>), sendo delimitado o escopo do “berço ao portão”, considerando as seguintes etapas: (A1) extração e produção das matérias-primas. (cimento Portland, partículas de bambu, aditivo cloreto de cálcio e água), (A2) transporte e (A3) produção do bio-concreto, de acordo com a organização da EN 15978 <sup>(11)</sup>.

### 2.2.3. Análise de inventário

Foi utilizada a Declaração Ambiental (DAP) do Cimento Portland CPV-ARI para o inventário do cimento empregado no BCB. Para as partículas de bambu foi considerado o tratamento realizado no



laboratório com lavagem a 80°C, moagem e peneiramento, sendo contabilizados o consumo de água e energia elétrica durante esses processos.

Para o aditivo  $\text{CaCl}_2$  foi adotado o processo disponível no Ecoinvent v.3.3, com adaptação da energia elétrica para a matriz de energia brasileira e distâncias de transporte.

Para o transporte dos insumos foi realizada uma análise de incertezas, sendo considerada que a fábrica hipotética do BCB se localiza na região Sudeste e assim foram considerados quatro distâncias de transporte dos insumos utilizados: 50 km, 100 km, 200 km e 400 km, com base no mapeamento das indústrias de produtos de bambu e cimento, onde esse procedimento é similar aos estudos realizados por Invidiata e Ghisi <sup>(17)</sup>. Dessa forma, os resultados foram apresentados com base nos valores de desvio padrão. Foi adotado o transporte dos insumos via modal rodoviário, com consumo de óleo diesel pelos caminhões, procedimento normalmente empregado para o transporte de materiais de construção civil no Brasil <sup>(18)</sup>. Foi utilizado o transporte com caminhões do tipo EURO 3, obtido do Ecoinvent v. 3.3. Para a produção do BCB relacionou-se operações similares que ocorrem em uma usina convencional de concreto, considerando a energia gasta para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto, sendo obtidos do Ecoinvent v. 3.3. A matriz de energia elétrica foi adaptada à realidade brasileira.

#### 2.2.4. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foi aplicado o método CML-IA Baseline, que é do tipo *midpoint*, sendo considerados somente as sete categorias de impactos ambientais apresentados na EN 15978 <sup>(11)</sup>, sendo elas: Potencial de Aquecimento Global (GWP100), Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (ODP), Potencial de acidificação (AP), Potencial de eutrofização (EP), Potencial de criação de ozônio fotoquímico (POCP), Potencial de Depleção de Elementos (ADP-e), Potencial de Depleção de Combustíveis Fósseis (APD-ff).

#### 2.2.5. Indicadores de Desempenho Mecânico-Ambiental

O emprego de indicadores de desempenho mecânico-ambiental já é uma prática comum nos estudos de ACV aplicados aos concretos, como pode ser visto nos estudos de Van Den Heede e De Belie <sup>(5)</sup>, Celik et al. <sup>(6)</sup>. Os resultados dos impactos ambientais, expressos em suas unidades, foram divididos pela resistência à compressão de cada mistura, expressa em MPa.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados dos potenciais impactos ambientais avaliados.

Figura 3 — Avaliação do potencial de aquecimento global. (A) ACVd. (B) CML-IA.

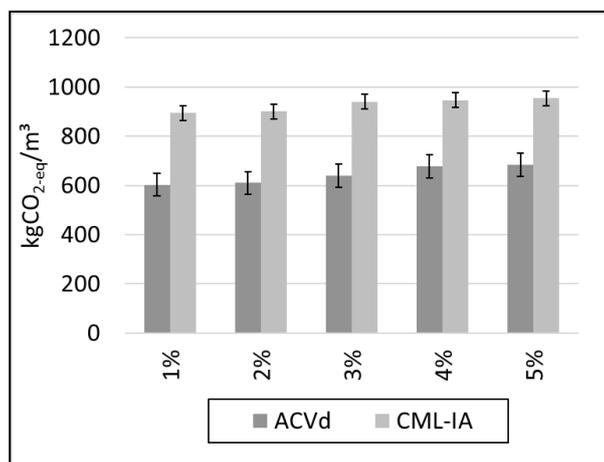
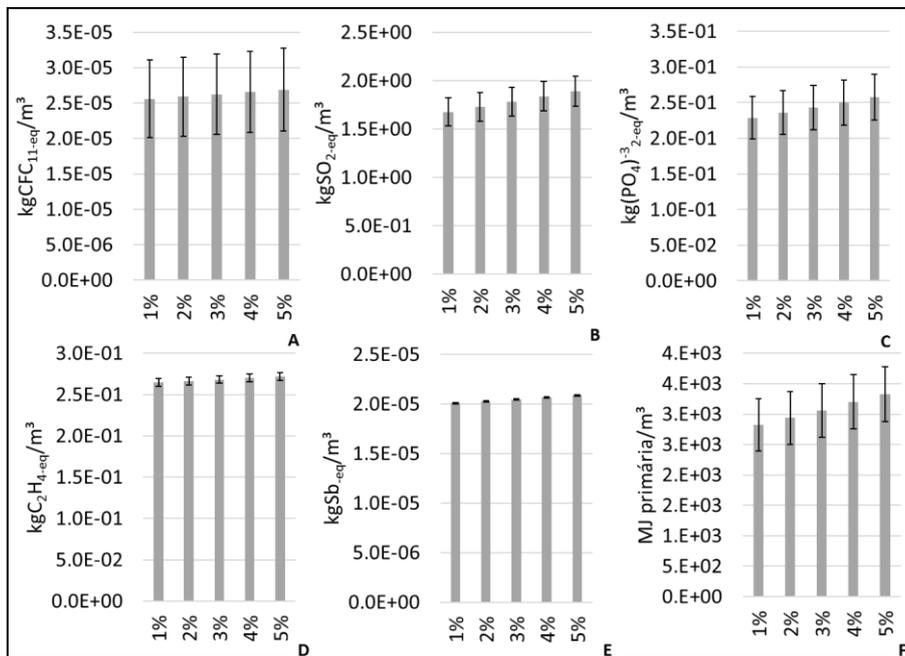


Figura 4 — Avaliação dos Potencial de Aquecimento Global. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.

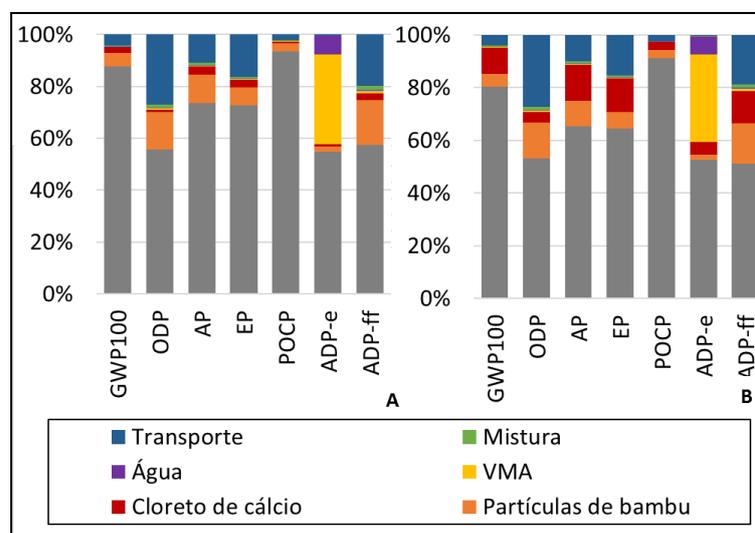


O uso da ACVd se mostrou mais adequado para a avaliação do BCB pois pôde quantificar o impacto em termos de GWP100 do CO<sub>2</sub> que é absorvido durante o crescimento dos colmos de bambu, com diferenças na ordem de 40% a 48%. Portanto, deve ser o método utilizado para a avaliação dessa categoria de impacto para bio-concretos ou outros biomateriais.



A maior diferença com o aumento do teor de cloreto de cálcio no traço do bio-concreto ocorreu para as categorias de ADP-ff, AP, EP e GWP100 chegando a mais de 18% entre o BCB com 5% e 1%, para a primeira categoria, enquanto as outras categorias de impacto apresentaram diferenças inferiores a 5%. As quatro primeiras categorias são aquelas em que a participação do  $\text{CaCl}_2$  é maior, como é possível observar na Figura 5, em função principalmente do calor utilizado na produção. Para essas categorias há também uma maior contribuição da etapa de transporte, devido ao consumo do diesel, já que mais  $\text{CaCl}_2$  será transportado.

Figura 5 — Perfil ambiental das misturas de bioconcreto de bambu. (A) 1%  $\text{CaCl}_2$ . (B) 5%  $\text{CaCl}_2$ .



O cimento foi o insumo mais impactante para a maioria das categorias, que está relacionado a produção do clínquer, principalmente ao processo de calcinação do carbonato de cálcio e consumo de combustíveis fósseis, sendo sua maior parcela o coque de petróleo. Portanto, o consumo de cimento deve ser diminuído, com substituição de materiais com menos impacto ambiental, como por exemplo, a utilização parcial de cinza volante, metacaulim e outras adições minerais, considerando questões de disponibilidade, desempenho e durabilidade.

Para as partículas de bambu os impactos estão relacionados ao consumo de energia elétrica para o beneficiamento. O consumo de água só se mostrou impactante para a categoria de ADP-e. A análise de sensibilidade para as distâncias de transporte mostrou que ela é importante para as categorias de ODP, EP e ADP-ff, devido ao consumo de diesel, que impacta diretamente nessas categorias.

Quando se comparam os resultados dessa pesquisa com outros bio-concretos, como os de Arrigoni et al. <sup>(15)</sup> e Pretot et al. <sup>(19)</sup>, os resultados se diferem drasticamente pois o bio-concreto de cânhamo,



avaliado por esses autores, apresenta uma composição e desempenho mecânico bastante diferente do BCB de bambu. No entanto, todos esses autores deram crédito ao carbono biogênico armazenado na biomassa (considerando como emissões negativas de CO<sub>2</sub>), mostrando que essa contabilização é importante para a avaliação de biomateriais.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os indicadores de desempenho mecânico e ambiental, em que potenciais impactos ambientais são normalizados pela resistência à compressão (em MPa). Os quadrados vermelhos indicam a mistura que foi mais ecoeficiente, considerando cada categoria de impacto ambiental.

Figura 6 — Avaliação do Potencial de Aquecimento Global normalizado pela resistência à compressão. (A) ACVd. (B) CML-IA.

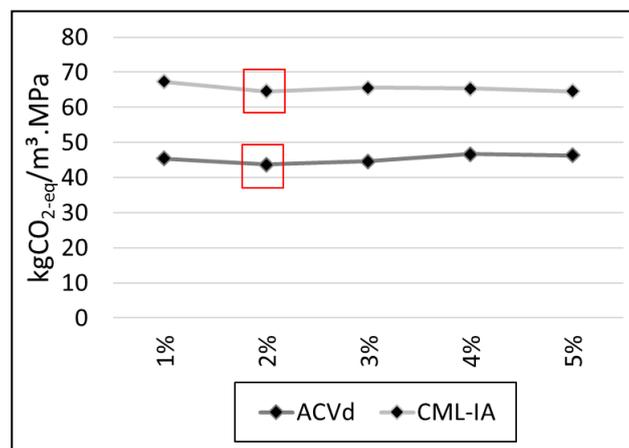
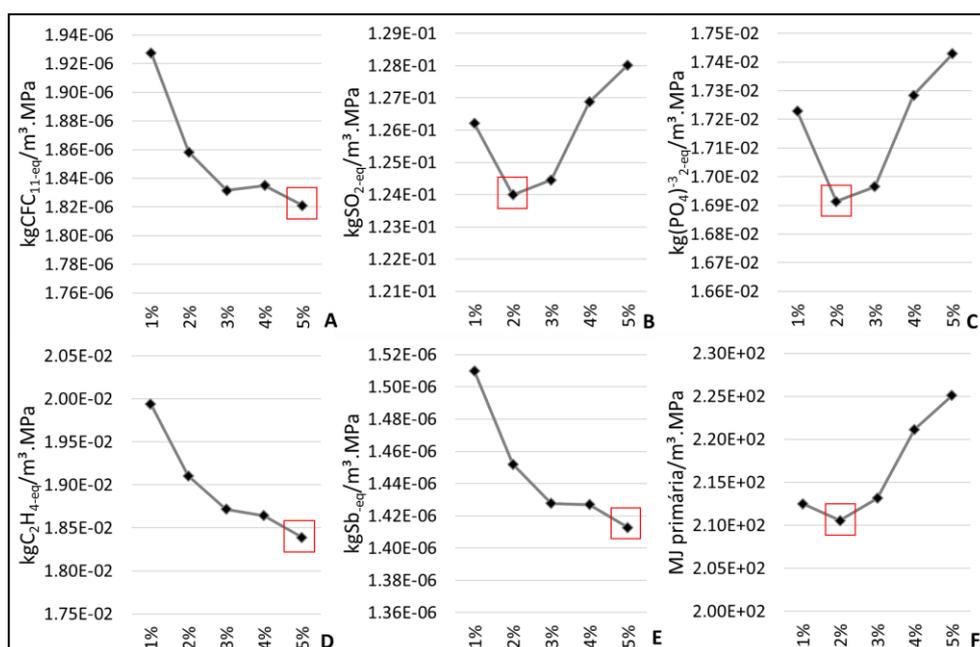


Figura 7 — Avaliação dos potenciais impactos ambientais normalizados pela resistência à compressão. (A) Depleção da camada de ozônio. (B) Acidificação. (C) Eutrofização. (D) Formação de fotooxidantes. (E) Depleção abiótica de recursos – elementos. (F) Depleção abiótica de combustíveis fósseis.





Observa-se que nem todas as categorias de impacto ambiental convergem para a mistura com o teor de  $\text{CaCl}_2$  mais eficiente, sendo verificado o teor de 5% para as categorias de ODP, POCP e ADP-e e 2% para as categorias GWP100 (ambos os métodos) AP, EP e ADP-ff. Em estudos de ACV esse tipo de resultado é comum <sup>(20)</sup>, tendo em vista que diferentes materiais e processos produtivos exercem diferentes impactos ambientais, portanto, com contribuição diferente nos resultados finais. Nesta ótica, o tomador de decisão deve escolher quais as categorias de impacto são mais importantes para o seu contexto. O primeiro ponto é saber a magnitude de cada impacto ambiental. Por exemplo: o GWP100 e ODP são classificados como impactos globais, enquanto os outros são considerados impactos locais.

Como o BCB foi pensado como uma solução alternativa para a mitigação das Mudanças Climáticas e como essa categoria tem abrangência global, a categoria de GWP100 foi considerada como a mais importante.

Para o método CML as categorias de AP e POCP apresentam escopo de aplicação direcionado para o contexto europeu <sup>(21)</sup>. Especificamente para a categoria de ADP-e os resultados não podem ser tão reais ao contexto onde o material é desenvolvido, em função da categoria medir a exaustão dos recursos naturais, ou seja, a relação entre consumo e disponibilidade de dado recurso. Como foi utilizado um banco de dados internacional, o dado de disponibilidade pode não retratar as condições reais, ainda mais se considerar a disponibilidade local de dado recurso, por exemplo na região Sudeste considerada neste estudo. Sendo assim, essas três categorias não serão consideradas como prioritárias.

Outra consideração importante em relação ao desenvolvimento de novos materiais, é o custo de produção. Esse tópico está diretamente relacionado ao custo de suas matérias primas, que no caso do BCB, a matéria-prima utilizada que apresenta custo mais elevado é o  $\text{CaCl}_2$ . Neste sentido, um aumento de seu consumo leva a um aumento do custo do BCB.

Ao final, a partir dessas considerações, foi verificado que a mistura com teor de 2% foi a mais ecoeficiente, tendo em vista que ela apresentou menores valores de impactos ambientais para cada MPa de resistência à compressão, para categorias de impacto classificadas como prioritárias, além de ter um menor consumo do  $\text{CaCl}_2$ , que é a matéria prima de maior custo para a produção do BCB.

O desenvolvimento de novos materiais aliado com o emprego de indicadores ambientais, se mostrou como uma alternativa interessante e eficaz para a verificação da ecoeficiência do produto. Tendo em vista que durante o desenvolvimento de novos materiais, existem muitas incertezas e



diferentes caminhos, a utilização desses indicadores em conjunto com os resultados de desempenho mecânico, tornam-se importantes balizadores para o desenvolvimento de um material mais ecoeficiente.



## 4. CONCLUSÕES

Dentre as misturas avaliadas, o cenário que utilizou 2% de  $\text{CaCl}_2$  apresentou o melhor resultado em termos de ecoeficiência para a maioria dos casos. O cimento se mostrou o insumo mais impactante para a maioria das categorias de impacto avaliadas, seguido do tratamento dos resíduos de bambu. O aumento do consumo de  $\text{CaCl}_2$  se mostrou importante para as categorias de Depleção de Combustíveis Fósseis (ADP-ff), Acidificação (AP), Eutrofização (EP) e Potencial de Aquecimento Global (GWP100). A metodologia de ACVd se mostrou mais adequada para avaliar o GWP100 por quantificar o  $\text{CO}_2$  absorvido durante o crescimento do bambu na plantação.

A metodologia utilizada nesta pesquisa poder ser aplicada no desenvolvimento de outros materiais de construção inovadores, sendo, portanto, uma importante contribuição, para a produção e validação, em termos quantitativos, de materiais mais ecoeficientes.

Para futuras análises, pretende-se quantificar outros impactos ambientais do bio-concreto avaliado, como depleção de recursos hídricos, além da avaliação dos custos para a produção do material. Ademais, a avaliação das propriedades referentes à durabilidade e características higrótérmicas, que poderão ser utilizados para a proposição de novos indicadores de ecoeficiência.



#### 4. REFERÊNCIAS

1. RAMAGE, M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.68, p.333-359, 2017.
2. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial**. 2017.
3. BOVEA, M. D., POWELL, J., 2016. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Management*. 50,151-172.
4. FAIRBAIRN, E. M. R.; PAULA, T. P.; CORDEIRO, G. C.; AMERICANO, B. B., 2012. Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana: redução de emissão de CO<sub>2</sub> e potencial de créditos de carbono. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. 5 (2), 229-251.
5. VAN DEN HEEDE, P., DE BELIE, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations”. **Cement and Concrete Composites**. 34 (4), 431–442.
6. CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL, A. P.; MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M.; Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of selfconsolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, 2015, 56, (59–72).
7. ANDREOLA, V. M. **Caracterização Física, Mecânica e Ambiental de Bio-Concretos de Bambu**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2017.
8. DA GLORIA, M.Y.R.; TOLEDO FILHO, R.D.. . Influence of the wood shavings/cement ratio on the thermo-mechanical properties of lightweight wood shavings-cement based composites. In: 6th AMAZON & PACIFIC GREEN MATERIALS CONGRESS and SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS LAT-RILEM CONFERENCE, 2016, Cali. **Proceedings of ...** April 27- 29th, 2016.. Cali: Track Comunicación, 2016. p. 365-374.
9. CALDAS et al.; MENEZES, A. P. N.; DA GLORIA, M. Y. R.; ANDREOLA, V. M.; SANTOS, D.;TOLEDO FILHO, R. D. Carbon Footprint and Water Scarcity Assessment of Wood Bio-Concretes: Evaluation of Different Life Cycle Impact Methods. In: 18th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies ”Construction Materials & Technologies for Sustainability, 2019, Nairobi **Proceedings of ...**Nairobi, Kenya, 2019.
10. Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
11. European Committee for Standardization (CEN). **EN 15978**: sustainability of construction works: assessment of environmental performance of buildings – calculation method. Brussels, 2011.
12. LEVASSEUR, A., LESAGE, P., MARGNI, M., DESCHÊNES, L., SAMSON, R., 2010. Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. **Environ. Sci. Technol.** 44, 3169-3174.
13. PEÑALOZA, D., ERLANDSSON, M., FALK, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. **Constr. Build. Mater.** 125, 219-226.



14. GARCIA, R., FREIRE, F., 2014. Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. **J. Clean. Prod.** 66, 199 – 209.
15. ARRIGONI, A., PELOSATO, R., MELIÀ, P., RUGGIERI, G., SABBADINI, S., DOTELLI, G., 2017. Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. **J. Clean. Prod.** 149, 1051–1061.
16. PITTAU, F., KRAUSE, F., LUMIA, G., HABERT, G. 2018. Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. **Build. Env.** 129, 117-129.
17. INVIDIATA, A., GHISI, E., 2016. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. **J. Clean. Prod.** 133, 1371–1383.
18. CALDAS, L. R., SPOSTO, R. M., 2017. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91108, out./dez. 2017.
19. PRETOT, S., COLLET, C., GARNIER, C., 2014. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. **J. Clean. Prod.** 72, 223 – 231.
20. LASVAUX, S.; ACHIM, F.; GARAT, P.; B.PEUPORTIER, B.; CHEVALIER, J.; G.HABERT, G. 2016. Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters?. **Ecological Indicators**. 67, 174-182.
21. JOINT RESEARCH CENTRE, 2010. **Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment**: background document. (ILCD Handbook). 2010.



## AVALIAÇÃO DO CAROÇO DE AÇAÍ “IN NATURA” PARA USO COMO AGREGADO GRAÚDO LEVE

**Marco Antônio Barbosa de Oliveira<sup>(1)</sup>; Kleber Roberto Matos da Silva<sup>(2)</sup>; Marcos Vitor Mescouto Miranda<sup>(3)</sup>; Ruan Pinheiro Costa<sup>(4)</sup>; Stefany Costa Brandão<sup>(5)</sup>** (1) Docente, Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do Pará – marco.barbosa@ifpa.edu.br; (2) Docente, Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do Pará – donkleber@hotmail.com; (3) Técnico em estradas, Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do Pará – marcosvotormiranda@gmail.com; (4) Técnico em estradas, Instituto federal de educação, ciência e tecnologia do Pará – ruan02costa@outlook.com; (5) Tecnologia em Saneamento Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – stefanycostabrandao@hotmail.com;

### RESUMO

O beneficiamento do açaí, fruta nativa da Amazônia, aproveita apenas 15% de cada fruto de açaí, que pesa cerca de 1g, ou seja, somente 15% deste é comestível (polpa com casca), sendo necessários cerca de 2,5 kg de frutos para produzir 1 L de suco da fruta, o restante representa o caroço, contendo a semente oleaginosa. Nos locais onde se prepara esse alimento, encontram-se os caroços secos amontoados (biomassa residual), representando um resíduo a ser destinado, SOUSA (2017) <sup>(1)</sup>. Com a finalidade de reduzir a quantidade de resíduos direcionados aos canais e bueiros, que obstruem e causam alagamentos, tem ocorrido a uma procura por usos alternativos do caroço. Deste modo, este estudo tem objetivo de avaliar o caroço de açaí “in natura” para uso como agregado graúdo leve, a partir da caracterização granulométrica, massa unitária e específica, conforme NBR NM 248 ABNT:2003<sup>(2)</sup>, NBR NM 45 ABNT:2006<sup>(3)</sup> e NBR NM 53 ABNT:2009<sup>(4)</sup>. Constatou-se que caroço de açaí se enquadra na faixa granulométrica e massa unitária, de acordo com a ASTM C330/330M-17<sup>a</sup> <sup>(5)</sup>. Portanto, aponta potencialidade do caroço de açaí “in natura” como agregado graúdo leve para aplicação em concreto leve não estrutural, sendo sua aplicação imprescindível para a redução de resíduo que seria descartado inadequadamente.

**Palavras-chave:** *materiais; resíduos sólidos; caroço; açaí; granulometria; massa unitária; massa específica*

## EVALUATION OF THE AÇAÍ SEED “IN NATURA” FOR USE AS A LIGHTWEIGHT COUSE AGGREGATE

### ABSTRACT

The processing of açaí, a native fruit of the Amazon, takes advantage of only 15% of each açaí fruit, which weighs about 1g, that is, only 15% of it is edible (pulp in shell), requiring about 2.5 kg of fruits to produce 1 L of fruit juice, the remainder represents the stone, containing the oilseed. In the places where this food is prepared, there are the heaped dry lumps (residual biomass), representing a waste to be destined, SOUSA (2017) <sup>(1)</sup>. In order to reduce the amount of waste directed to the channels and culverts that obstruct and cause flooding, there has been a search for alternative uses for lump. In this way, this study has the objective of evaluating a açaí "in natura" lump for use as a lightweight aggregate, based on the granulometric characterization, unit and specific mass, according to NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 45 (ABNT, 2006) and NBR NM 53 (ABNT, 2009). Açaí seed was found to fit within the granulometric range and unit mass, according to ASTM C330 / 330M-17a and ASTM C331 / 331M-17. Therefore, it points out the potency of açaí "in natura" as a lightweight aggregate for application in light non-structural concrete and its application is essential for the reduction of residue that would be inappropriately discarded.

**Key-words:** seed; açaí; granulometry; unit mass; Especific mass



## 1 INTRODUÇÃO

O açazeiro (*Euterpe Oleracea*) é nativo da Amazônia brasileira, do seu fruto é extraído o suco, polpa ou simplesmente açaí, como é conhecido na região, representando um importante alimento para populações locais, com produção anual de frutos no Brasil por volta de 219.885 t/ano (IBGE: 2017) <sup>(6)</sup>.

Durante o beneficiamento, a polpa representa 15% do peso total do fruto e é aproveitado de forma tradicional, no consumo alimentar, sorvetes e outros produtos derivados e o caroço correspondem a 85%. Levando isso em consideração, seu beneficiamento produz um resíduo em quantidade exorbitante, resíduo que se tornou um inconveniente para os moradores da região metropolitana de Belém, principalmente ao que se refere ao seu descarte. Pois, como o caroço não possui destino certo, o mesmo é considerado um resíduo de produção, no qual se for lançado no meio sem nenhum controle pode provocar problemas ambientais, como observa Tinoco:2005 citado por Luamin: 2014 <sup>(7)</sup>.

Atualmente a região metropolitana de Belém encontra-se com mais de 3.000 pontos de venda da polpa do açaí. Sua comercialização está em torno de 201.553 t/ano, ou seja, 91,6% da produção é realizada no Pará, de acordo com pesquisa realizada no site do IBGE, referente ao ano de 2017 <sup>(6)</sup>. Segundo a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2012) <sup>(8)</sup>, que dispõe sobre os princípios, diretrizes, objetivos e instrumentos relativos à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, o manejo dos resíduos sólidos e a limpeza urbana devem centrar-se no atendimento às dimensões ecológica, ambiental, cultural, demográfica, social, institucional, política, econômica, legal e ética. Visando a sustentabilidade ambiental nas cidades brasileiras – seja pela destinação adequada de resíduos, seja pela redução do consumo de recursos naturais – faz-se necessário um maior desenvolvimento da gestão dos serviços públicos envolvidos (SILVA, 2016) <sup>(9)</sup>. Para tanto, o conhecimento dos instrumentos legais que possuem conexão com a temática de saneamento, assim como o correto diagnóstico da situação dos municípios e as variações em escala regional são fundamentais para a proposição de uma política eficiente.

Souza (2017) <sup>(1)</sup> discursa a respeito da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) <sup>(8)</sup>, que os caroços de açaí são considerados como resíduos de atividade comercial, logo a responsabilidade para a coleta e destinação é de seu gerador, no caso os batedores. Como não são realizadas fiscalizações nos estabelecimentos responsáveis pelo processamento do fruto, ocorre uma grande



problemática quanto à disposição inadequada dos caroços de açaí, contribuindo para problemas ambientais e sanitários de uma cidade.

Com a falta de gestão, encontram-se caroços em lixões a céu aberto, canais e esquinas da cidade, de forma que o descarte inadequado dos resíduos dos frutos do açaí pós-beneficiamento tem modificado a paisagem natural do ambiente, trazendo desconforto aos habitantes que vivenciam esta situação diariamente, e contribuindo para o entupimento de córregos, esgotos e igarapés. Visando a mitigação de transtornos causados pela disposição do caroço de açaí em locais inadequados, tem-se a procurar uma alternativa à esta problemática.

Em vista disso, os resíduos de caroços de açaí já são utilizados como combustível de biomassa verde, para geração de energia elétrica, mecânica e gás combustível para algumas comunidades quilombolas, etc., como uma forma de reaproveitamento do material que antes seria descartado. Outra linha de pesquisa é a das fibras de açaí que, nos últimos anos, vêm sendo investigadas para aplicação na construção civil, devido a suas propriedades mecânicas, como aditivos para materiais compósitos poliméricos, potencializando suas propriedades físicas (GOES *et. al.*: 2014;<sup>(10)</sup> MARTINS *et. al.*: 2009<sup>(11)</sup>).

Para se iniciar a aplicação do resíduo em diversas atividades, dentre elas na construção civil, primeiramente deve-se realizar ensaios para determinação da granulometria do material, analisando através disso e em comparação com NBR NM relevante, se a utilização do resíduo é viável. Entretanto, é importante destacar que não existe uma granulometria ideal para um determinado agregado, o que se busca de modo geral, é a compatibilização entre os requisitos físicos e econômicos. Areias muito grossa, por exemplo, produzem misturas de concreto ásperas e com baixa trabalhabilidade, já as muito finas farão com que ocorra um aumento no consumo de água (consequentemente, o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento e são antieconômicas. SOUZA: 2010 apud ROSÁRIO: 2013<sup>(12)</sup>).

Agregado leve possui uma característica importante para obtenção de concreto leve. De acordo com Mehta e Monteiro:2008<sup>(13)</sup>, são considerados agregados leves quando possuem geralmente massa unitária inferior a 1120 kg/m<sup>3</sup>, em função da microestrutura celular ou porosidade elevada. Segundo ACI 213R:2003<sup>(14)</sup>, concreto com agregado leve possuem baixa massa específica, que propiciam redução de custos e facilidade de transporte.

Diversas propriedades dos concretos são influenciadas pela substituição de agregados tradicionais por agregados leves, dentre as quais a massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica,



módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, Rosario:2013<sup>(12)</sup>.

## 2 METODOLOGIA

Utilizou-se um programa experimental para atingir os objetivos da pesquisa quanto a avaliação do caroço de açaí “*in natura*” para uso como agregado graúdo leve.

### 2.1 MATERIAIS

Inicialmente houve a coleta do caroço de açaí, conforme a NBR NM 26 ABNT: 2001<sup>(15)</sup>, que estava armazenado em maxis sacos “*big bag*” de polipropileno provenientes do box da feira, localizada na Av. 25 de setembro no Município de Belém do Para (Figura 1).

Figura 1 - Local de coleta do Caroço de Açaí (Autoria Própria, 2019)



Em seguida, ocorreu à lavagem para retirada de fibras moídas durante processo de extração do suco ou polpa de açaí (Figura 2). E espalhou-se sobre lona à temperatura ambiente para secagem por uma semana (Figura 3). Por conseguinte houve secagem em estufa à temperatura de 50°C com verificação de constância de massa a cada 24 horas para perda apenas de umidade. Obteve-se massa constante após terceiro dia desse procedimento de secagem com ciclo de 24 horas.



Figura 2 - Lavagem do Carçoço (Autoria Própria, 2019)



Figura 3 – Secagem do Carçoço (Autoria Própria, 2019)



## 2.2 MÉTODOS

Houve a caracterização granulométrica, massa unitária e específica, respectivamente, conforme a NBR NM 248 ABNT: 2003<sup>(2)</sup>, NBR NM 45 ABNT: 2006<sup>(3)</sup> e NBR NM 53 ABNT: 2009<sup>(4)</sup>, conforme é utilizada para agregado graúdo normal. Posteriormente houve enquadramento do carçoço de açai na faixa granulométrica e massa unitária, de acordo com a ASTM C330/330M-17a (5).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado médio de três determinações da composição e curva granulométrica do carçoço de açai, respectivamente, está apresentado na Tabela 1 e mostrado na Figura 4. Na Tabela 1 apresenta-se a caracterização física do carçoço de açai (CA), que ocorreu a partir de ensaio padronizado para agregado graúdo normal, conforme NBR NM 248:2003<sup>(2)</sup>. A massa retida total (998,7g) obtida não

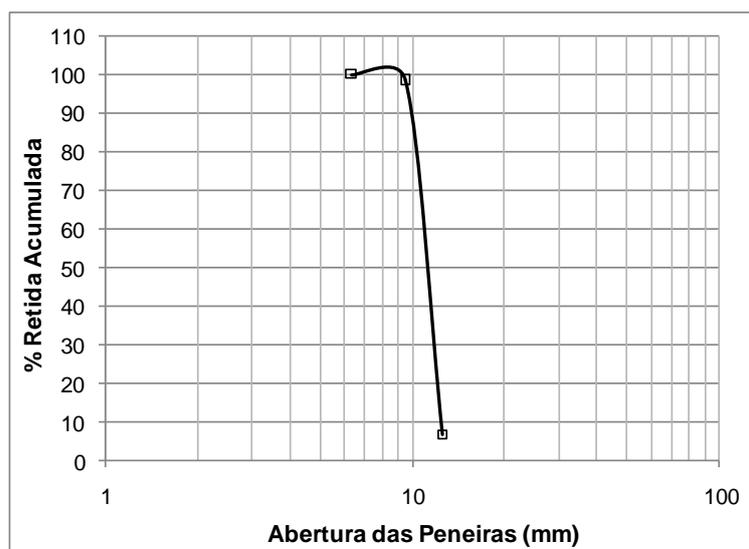


difere acima de 0,3% da massa inicial de 1000 g, segundo a NBR NM 248 ABNT:2003<sup>(2)</sup>. Verificou-se que houve enquadramento do caroço de açaí para agregado graúdo leve na faixa granulométrica, entre 9,5 mm e 4,75 mm, e de massa unitária obtida de 640 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2 da ASTM C330/330M-17<sup>a</sup> (14), visto que na Tabela 2 tem-se massa unitária de 880 kg/m<sup>3</sup> para enquadrar-se como agregado graúdo leve.

Tabela 1 - Composição Granulométrica do Caroço de Açaí (Autoria Própria, 2019)

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Retida (%)</b>	<b>Retida acumulada (%)</b>	<b>Método de ensaio (NBR)</b>
12,5	65,85	6,59	6,59	
9,5	917,97	91,91	98,51	
6,3	14,00	1,40	99,91	ABNT NBR NM 248 (2003)
Fundo	0,90	0,09	100,00	
Total	998,70			
<b>Modulo de finura</b>			0,99	ABNT NBR NM 248 (2006)
<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>			0,64	ABNT NBR NM 45 (2006)
<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>			1,49	ABNT NBR NM 53 (2009)
<b>Dimensão Máxima Característica (DMC)</b>			12,5 mm	ABNT NBR NM 248 (2006)

Figura 4 - Curva granulométrica do caroço de açaí (Autoria Própria, 2019)





agregado graúdo sintético ou natural, conforme apresentado na Tabela 2. Nota-se que houve proximidade com resultado de massa unitária de caroço de açaí desta pesquisa com utilizado no estudo de Souza:2013<sup>(19)</sup>.

A massa específica do material em estudo apresentou-se baixa em comparação com a massa específica de demais agregados graúdos, conforme apresentado na Tabela 2, com mais proximidade ao de Rosario:2013<sup>(12)</sup>. Considerado que a maioria dos agregados naturais possui massa específica entre 2,6 g/cm<sup>3</sup> e 2,7 g/cm<sup>3</sup> NEVILLE e BROOKS:2013<sup>(21)</sup> os resultados para o caroço de açaí e para o agregado sintético de lama vermelha apresentado por Rosário (2013) <sup>(12)</sup> estão com valores de massa específica abaixo do esperado, o que não significa que não são aplicáveis como agregado leve, pelo contrário, de acordo com CARASEK:2007<sup>(22)</sup> agregados com massas específicas baixas podem resultar em uma argamassa leve, e a mesma está diretamente ligada a sua trabalhabilidade, ou seja, o nível de trabalhabilidade é proporcional a leveza das argamassas, ademais, reduz o esforço realizado pelo operário para aplicar a argamassa aumentando sua produtividade.

A quantidade de vazios, determinada pela subtração da massa específica e a massa unitária, obteve o resultado de 0,85. De acordo com Neville e Brooks:2013<sup>(21)</sup> a durabilidade do concreto com sua capacidade de permeabilidade, a quantidade de vazios presentes na massa de concreto abre espaços para a ação de agentes químicos, além de reduzir a resistência mecânica da estrutura. Assim, um concreto com menor número de vazios (poros) se torna um concreto mais resistente e durável, pois a presença de água e contaminantes passa a ser menor.

Tabela 2 – Análise comparativa dos resultados (Autoria Própria, 2019)

Propriedades	Author	Souza	Rosário	Oliveira	Luamim
	2019	2013 <sup>(19)</sup>	2013 <sup>(12)</sup>	<i>et. al.</i> 2015 <sup>(18)</sup>	<i>et. al.</i> 2013 <sup>(7)</sup>
	Caroço de Açaí		Agregado Sintético LV	Agregado Natural	Graudo
MU (g/m <sup>3</sup> )	0,64	0,69	11,8	1,46	1,56
ME (g/cm <sup>3</sup> )	1,49	2,10	1,30	2,53	2,53
DMC (mm)	12,5	-	19	12,5	25
MF	0,99	-	3,18	4,93	3,84



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as conclusões desse estudo, houve proximidade dos resultados obtidos pelos agregados não convencionais mencionados e os agregados naturais/sintéticos referenciados, como esperado a MU e ME do agregado em questão se mostrou útil quando se procura uma maior trabalhabilidade do material e principalmente, a redução do peso da estrutura. A partir da análise dos resultados de granulometria obtidos para possível aplicação do caroço de açaí, podemos concluir que, tem pontos positivos, podendo ser amplamente aproveitado se empregado da forma correta.

Em termos de preservação ambiental, com a utilização do CA como agregado graúdo para a confecção de concreto leve não estrutural, tem-se uma diminuição de enchentes e de possíveis vetores de doenças que, devido ao acúmulo de resíduos, possam surgir. É comum observar a disposição inadequada deste resíduo pelas esquinas, calçadas e terrenos baldios, qualquer medida que possa influenciar os próprios moradores a acondicionar corretamente estes resíduos e trazer materiais e técnicas inovadoras deve ser influenciada.

Deste modo caroço de açaí apresenta características que habilitam a ser utilizados na dosagem de concretos como agregado graúdo leve, contudo é necessária uma análise das proporções de agregado graúdo normal/caroço de açaí e tratamento por ser matéria orgânica, para que a se tenha um resultado mais exato dos benefícios da utilização do caroço de açaí em concreto leve não estrutural.

## 5 REFERÊNCIAS

1. SOUSA, M. S. ; DE OLIVEIRA, IZABELLE FERREIRA ; TAVARES, L. C. ; Teixeira, L. Girard ; TEIXEIRA, G. S. ; LOBÃO, Lucy Anne Cardoso ; COELHO, P. D. B. . **Quantificação do caroço de açaí para produção de carvão ativado no tratamento de água**. In: 3º Congresso Internacional RESAG 2017, 2017, Belo Horizonte. Anais do 3º Congresso Internacional RESAG 2017, 2017. p. 1-7
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 6 páginas, 2003.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 8 páginas, 2006
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 8 páginas, 2009.



5. ASTM C330 / ASTM C330/330M-17<sup>a</sup>. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2017.
6. IBGE 2017 – **Quantidade produzida na extração vegetal do açaí, unidade territorial: Brasil e Grande região**. Acesso em: 05/02/2019 AS 23:24. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289> >
7. LUAMIM, S. Tapajós; Ana G. A. da Silva; Francine F. da Silva; Felipe J. L. Reis; Mariana V. P. Lira; Paulo S. L. Souza. **A influência da cinza do caroço de açaí em propriedades mecânicas e absorção de água de concretos**. in: ANAIS DO 56º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2014 – 56CBC, 2014, p. 1-2.
8. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 – **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**.
9. SILVA, J. S.. **Gestão de resíduos sólidos e sua importância para a sustentabilidade urbana no Brasil: uma análise regionalizada baseada em dados do SNIS**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA), v. 12, p. 61-70, 2016.
10. GOES, R. O.; MORENO, S. O.; TAVAR, F. F. C. **Produção e avaliação das propriedades físicas e mecânicas de “madeira sintética” processada a partir do resíduo do beneficiamento do açaí**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, SC, 2014.
11. MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; PESSOA, J. D. C. **Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras de mesocarpo e caroço do açaí (Euterpe oleracea mart.)** Revista Brasileira de Fruticultura, v. 31, n. 4, p.1150-1157, 2009.
12. ROSÁRIO, Kátia Alrelhio. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: Estudos de dosagem, propriedades e microestrutura**. Universidade Federal do Pará. Belém, 2013.
13. MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais – 3ª Edição**. Ed.: IBRACON. ISBN, p. 674, 2008.
14. American Concrete Institute – ACI. Guide For structural lightweight aggregate concrete, **ACI 213R-03**. ACIA Manual of Concrete Practice, 2003.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 10 páginas, 2001.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7211**. Agregados para concreto - Especificação. Comitê: ABNT/CB-18 Cimento, Concreto e Agregados. 11 páginas, 2005.
17. SOUSA, A.C.A; CARVALHO, T.S.; COSTA, J.H.B; SILVA, K.R.M. **Caracterização de agregado miúdo utilizado para a construção civil em Belém do Pará**. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belém, 2017.
18. OLIVEIRA, M.A.B. **Tubos de concreto com fibras de aço e agregados de Belém do Pará**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2015.
19. SOUZA. R. J. Q. DE. **Validação Tecnológica Do Caroço Do Fruto Do Açaí Como Material Alternativo Na Pavimentação De Baixo Volume De Tráfego**. Universidade Federal Do



- Amazonas Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Recursos Da Amazônia (Ppg-Engram). Manaus, 2013.
- 20.NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed., [s.l., s.n.], 2013.
- 21.CARASEK, H. Argamassas. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. ISAIA, G.C. (Organizador/Editor). São Paulo: IBRACON, 2007 p863-804.



# ESTADO DO CONHECIMENTO ACERCA DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS E NORMATIVAS PARA USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

JULIA BARRETO HANDRO (1); ELAINE PINTO VARELA ALBERTE (1)  
(1) Universidade Federal da Bahia

## RESUMO

No Brasil existem normas específicas que estabelecem diretrizes para uso de agregados reciclados em pavimentação e em concreto sem função estrutural (ABNT NBR 15115 e ABNT NBR 15116). Contudo, pelo fato da reciclagem de resíduos de construção civil (RCC) ainda ser considerada uma atividade recente no país quando comparada a países mais desenvolvidos, torna-se compreensível ainda existirem lacunas a respeito da normatização destes materiais, bem como resistência por parte da indústria da construção em utilizá-los. Este estudo buscou realizar levantamento estruturado sobre produção técnica e normativa existente no cenário nacional e internacional para o uso de agregados reciclados de RCC. Para esta análise foram consideradas especificações técnicas, normativas e de controle de qualidade de 12 países, incluindo Brasil. Uma análise sistemática das normas permitiu a apreciação da produção técnica e normativa internacional suplementada com uma breve comparação com a última revisão nacional sobre o tema. Isto possibilitou o delineamento de sugestões para diretrizes técnicas e normativas para o uso desses materiais no Brasil. Espera-se que os resultados deste trabalho possam apoiar o setor da Construção Civil na evolução de especificações técnicas relacionadas, e produzam contribuições exitosas em caráter prático para consolidar o setor de reciclagem de RCC do país.

**Palavras-chave:** resíduos de construção civil; agregado reciclado; especificações técnicas e normativas.

## STATE-OF-THE-ART REVIEW OF CURRENT STANDARDS AND SPECIFICATIONS CONCERNING THE USE OF RECYCLED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

### ABSTRACT

In Brazil, there are specific standards that guide the use of recycled aggregates in pavements constructions and nonstructural concrete (ABNT NBR 15115 and ABNT NBR 15116). However, due to the fact that recycling construction and demolition waste (CDW) is still a recent activity in the country when compared to other countries, it is comprehensive that we have seen a gap regarding the standardization of these materials as well such as the resistance of the construction industry to using them. This study aims to obtain a systematic analysis of the literature review on technical and normative specifications for the use of recycled aggregates of construction and demolition waste at a national and international level. To this end, it was considered technical, regulatory and quality control standards and guidelines for the use of recycled aggregates from 12 countries, including Brazil. A systematic analysis of the standards allowed for an appraisal of the international technical and normative production analyzed, supplemented by a brief comparison with the last national review carried out on the subject. This allowed the proposal for technical guidelines and normative for the use of recycled construction and demolition materials in Brazil. It is expected that the results of the work support the Construction sector in the growth of related specifications and standards, thus producing practical contributions for the consolidation of the CDW recycling sector in the Country.

**Key-words:** construction and demolition waste; recycled aggregate; technical specifications and standards.



## **1. INTRODUÇÃO**

Muitos países já apresentam especificações técnicas bem desenvolvidas para os agregados reciclados por já incluírem este material no contexto da construção civil há mais tempo, como por exemplo, Japão, Alemanha, Holanda, entre outros. Outros países já caminham para a inclusão de diretrizes para esses materiais em suas regulamentações. As aplicações, entretanto, se alteram segundo o país, de acordo com características particulares como oferta de matéria prima, geração de RCC, disponibilidade de locais para deposição, restrições normativas, entre outros fatores.

No Brasil, um dos grandes desafios enfrentados pelo setor se relaciona com a dificuldade da indústria em conhecer o potencial técnico do agregado reciclado (AR), dificuldade esta muitas vezes fomentada pela falta de especificações e de controle de qualidade mais detalhados.

Assim, o presente trabalho apresenta um levantamento estruturado sobre a produção técnica e normativa existente atualmente no cenário nacional e internacional sobre uso de ARs. Espera-se obter uma visão geral do que existe atualmente acerca do tema no Brasil e no mundo, para perceber a evolução das publicações normativas e identificar as lacunas existentes neste campo no país.

## **2. AGREGADOS RECICLADOS DE RCC: CENÁRIO MUNDIAL SOBRE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS E NORMATIVAS**

Goncalvez e Brito <sup>(1)</sup> fizeram uma revisão literária sobre uso de agregado reciclado em concreto a partir de normas e especificações de nove países. Os parâmetros foram densidade, absorção de água, porcentagem de contaminantes. Os autores verificaram que a maioria das especificações classifica os ARs em termos de sua composição em concreto e cerâmico, e cada um tem sua própria designação. Parâmetros presentes nas normas como porcentagem de AR, resistências máximas para o concreto e riscos do ambiente de utilização do concreto também foram comparados.

Tam et al. <sup>(2)</sup> realizaram uma revisão literária do cenário mundial de aplicação do AR em concreto do período de 2000 a 2017, através da comparações de especificações e normas e da coleta de dados de geração e reciclagem de RCC de diferentes países. Os autores observaram uma enorme variação no nível de reciclagem e recuperação desses países, por exemplo, Brasil (6%), Espanha (14%), Japão (81%), Holanda (98%). Situação esta responsabilizada às características particulares



de cada país, como oferta de materiais de construção e RCC, disponibilidade de locais para deposição, restrições das normas, entre outros fatores.

Na tabela 1 apresenta-se um resumo sobre as características de especificações técnicas e normativas identificadas no mundo acerca de agregados reciclados oriundos de RCC.

**Tabela 1 – Especificações técnicas e normativas identificadas no mundo para ARs**

País	Norma	Ano	Uso
Brasil	NBR 15115	2004	Camadas de reforço de subleito, sub-base, base de pavimentos e revestimento primário.
	NBR 15116	2004	Pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural.
Alemanha	DIN 4226 - 100	2002	Produção de concretos sem função estrutura e argamassas.
	DAfStb	2010	Concreto Estrutural.
	TLGESTEIN-STB	2005	Camadas de pavimento não ligadas hidráulicamente, pavimentos de concreto e camadas ligadas hidráulicamente, pavimentos de pedra e intertravados.
Áustria	OBRV;OGRB	2004	Camadas de base e sub-base de pavimentos, material para enchimento de valas.
Austrália	CSIRO HB 155	2002	Produção de concretos sem função estrutural e camadas de base e sub-base de pavimentos.
	DPTI	2001	Pavimentação e serviços de terraplanagem.
Bélgica	PTV 406	2016	Material granular para construção de estradas, argamassas, elevações de terreno e aterros.
	NBN B15 - 001	2006	Produção de concreto.
	EHE - 08	2000	Produção de concreto.
Espanha	IHOBE – País Basco	2011	Concreto, camadas de pavimentos, argamassas e serviços de terraplanagem.
	GEAR – RT	2012	Concreto, camadas de pavimento e serviços de terraplanagem.
	AOPJA - Andaluzia	2015	Pavimentação e concreto sem função estrutural.
EUA	MDOT	2012	Concreto sem função estrutural, pavimentos temporários e acostamentos.
	TxDOT	2017	Camadas de base de pavimentos.
	FDOT	2014	Pavimentos de concreto e estruturas de concreto.
Holanda	CUR	1983	Produção de concreto.
	NEN 5905	2005	Produção de concreto.
	RAW	2000	Camadas granulares de pavimentos e serviços de terraplanagem.
Hong Kong	WBTC N°12	2002	Produção de concreto e construção de bases e sub-bases de rodovias.
Inglaterra	U.K B.S 8500-2	2006	Produção de concreto.
	BRE DIGEST 433	1998	
Japão	JIS A 50	2005/2006/20	Produção de concreto de acordo com sua qualidade.
	21/22/23	07	
	OT 70085	2006	Produção de concreto.
Suíça	SN 670	1998	Camadas granulares de pavimentos e serviços de terraplanagem.
	142/143/144		
França (Internacional)	RILEM TC 121 - DRG	1994	Produção de concreto.

### 3. METODOLOGIA

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica estruturada com a finalidade de levantar dados sobre o conhecimento produzido a respeito do tema, por meio do mapeamento e análise estruturada de



publicações existentes. Foram pesquisadas essencialmente normas, especificações técnicas, diretrizes, manuais, guias, artigos, dissertações, teses e livros que abordassem e discutissem o tema. A partir desta documentação, foram analisadas especificações existentes em 12 países: Alemanha, Holanda, Bélgica, Espanha, Suíça, Áustria, Inglaterra, Austrália, Hong Kong, Japão, EUA e Brasil (Tabela 1). O levantamento das informações por norma/especificação técnica foi realizado de forma sistemática e comparativa através da tabulação dos seguintes dados:

- a) Composição dos Agregados: Identificação das classes de agregados determinadas, assim como os critérios de composição, conteúdo de impurezas aceito, presença de matéria orgânica. Para apoio à análise comparativa, adotou-se classificação unificada onde são considerados Agregados Reciclados de Concreto (ARC) aqueles que a composição em concreto prevaleça em relação à composição de cerâmica. De forma análoga, Agregados Reciclados Cerâmicos (ARCE) serão aqueles que possuam maior composição em materiais cerâmicos, e Agregados Reciclados Mistos (ARM) com ambos os materiais em porcentagens significativas ou similares.
- b) Uso como material granular em pavimentação: Principais requisitos exigidos aos agregados reciclados aplicados nesse uso como: índice de forma, CBR, índice de plasticidade entre outros.
- c) Uso como material para produção de concreto e argamassas: Principais requisitos exigidos aos agregados reciclados aplicados nesse uso como capacidade de absorção de água, densidade e porosidade, resistência ao desgaste por abrasão Los Angeles, Teor de cloretos e sulfatos.

A partir dos resultados obtidos, foram identificadas as principais fontes de convergências e divergências entre as especificações analisadas nos diversos países, bem como as principais possibilidades de evolução da situação normativa no Brasil frente ao universo analisado.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Composição dos agregados**

O Quadro 1 apresenta as classificações dos ARs por composição identificadas nas normas, nos guias e nos manuais avaliados. Em sua maioria, estes documentos se limitam a duas ou três categorias de classificação para os agregados reciclados, com exceção do guia espanhol GEAR (Guia Española de Áridos Reciclados) <sup>(3)</sup> na Espanha e da norma nacional Alemã DIN 4226 – 100 (2002) <sup>(1)</sup>.



**Quadro 1 – Resumo de requisitos dos ARs quanto à composição**

País	Norma	Classificação da norma	Classificação Unificada	Composição (%)						
				Concreto e agregados naturais	Cerâmica	Concreto	Material Orgânico	Impurezas	Partículas Leves	Material Betuminoso
Brasil	ABNT NBR 15116 (2004)	ARC	ARC	≥ 90	-	a)	c)	≤ 3		
		ARM	ARM	< 90	-	a)	c)	≤ 3		
Alemanha	DIN 4226 - 100 (2002)	Tipo 1	ARC	≥ 90	≤ 10	a)	-	≤ 0,2	-	≤ 1
		Tipo 2	ARC	≥ 70	≤ 30	a)	-	≤ 0,5	-	≤ 1
		Tipo 3	ARCE	≤ 20	≥ 80	a)	-	≤ 0,5	-	≤ 1
		Tipo 4	ARM	≥ 80		-	-	≤ 1	-	-
Áustria	OBRV;OGRV (2004)	ARC	ARC	-	-	-	-	≤ 1	-	-
		ARM	ARM	-	-	-	-	≤ 1	-	< 50%
Austrália	CSIRO HB 155 (2002)	Classe 1A	ARC	< 100	≤ 0,5	-	-	≤ 1	-	-
		Classe 1B	ARM	< 70	≤ 30	-	-	≤ 2	-	-
Bélgica	PTV 406 (2016)	ARC	ARC	≥ 90	≤ 10	≥ 70	-	≤ 1	< 5	≤ 5
		ARM	ARM	≥ 50	≤ 50	-	< 0,5	≤ 1	< 5	≤ 2
		ARC	ARCE	≤ 40	≥ 60	-	< 0,5	≤ 1	< 5	≤ 2
Espanha	EHE-08 (2000)	ARC	ARC	-	< 5	-	c)	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Norma de estradas - País Basco (2015)	ARC	ARC	≥ 90	≤ 10	≥ 50	-	≤ 1 <sup>d)</sup>	≤ 5cm <sup>3</sup> /kg	≤ 10
		ARM	ARC	≥ 70	≤ 30	≥ 50	-	≤ 1 <sup>d)</sup>	≤ 5cm <sup>3</sup> /kg	≤ 10
	IHOBE - País Basco (2011)	ARM <sup>e)</sup>	ARM	-	≤ 45	-	-	≤ 1 <sup>f)</sup>	-	≤ 1
	AOPIA - Andaluzia (2015)	ARC	ARC	≥ 90	-	-	-	≤ 1	≤ 1cm <sup>3</sup> /kg	-
		ARM I	ARC	≥ 70 <sup>h)</sup>	-	-	-	≤ 1	≤ 1cm <sup>3</sup> /kg	a)
		ARM II	ARM	≥ 55	-	-	-	≤ 1	≤ 2cm <sup>3</sup> /kg	-
		ARC	ARCE	≥ 90	-	a)	-	≤ 1	-	≤ 5
GEAR (2012)	ARMh	ARC	< 90	≤ 30	a)	-	≤ 1	-	≤ 5	
	ARMc	ARM	-	> 30	-	-	≤ 1	-	≤ 5	
	ARC	ARCE	-	> 70	-	-	≤ 1	-	≤ 5	
EUA	MDOT (2012)	ARC	ARC	-	≤ 5	< 100	-	i)	-	-
	FDOT(2017)	ARC	ARC	-	≤ 1	< 100	≤ 0,1	i)	-	-
Holanda	CUR (1984)	ARC	ARC	-	≤ 5	≥ 95	-	-	-	-
		ARC	ARCE	-	≥ 65	≤ 20	-	-	-	-
	NEN 5905 (2005)	ARC	ARC	< 100	≤ 5	-	≤ 0,1	≤ 1	≤ 0,1	-
RAW( 2000)	ARM	ARM	-	≤ 65	< 20	≤ 1	≤ 1	≤ 0,1	-	
	ARM	ARM	≥ 50	≤ 50	≥ 45	≤ 0,1	≤ 1	-	≤ 5	
Hong Kong	WBTC N° 12 (2002)	ARC	ARC	< 100	-	-	-	≤ 1	≤ 0,5	-
Inglaterra	BS 8500-2 (2002)	ARC	ARC	-	≤ 5	≥ 95	≤ 1	≤ 1	≤ 0,5 <sup>b)</sup>	≤ 5
		AR	ARCE	-	≤ 100	-	≤ 1	≤ 1	≤ 1 <sup>b)</sup>	≤ 10
	BRE DIGEST 433(1998)	AR I	ARCE	-	≤ 100	-	-	≤ 5	≤ 1 <sup>b)</sup>	c)
		AR II	ARC	≤ 90	≤ 10	-	-	≤ 1	≤ 0,5 <sup>b)</sup>	c)
		AR III	ARM	-	≤ 50	-	-	≤ 5	≤ 2,5 <sup>b)</sup>	c)
Japão	BCSJ (1977)	AR	ARM	-	-	-	-	-	-	≤ 2
	JIS A 5021 (2005)	ARH	ARC	-	-	-	-	-	-	≤ 3
	JIS A 5022 (2006)	ARM	ARC	-	-	-	-	-	-	-
	JIS A 5023 (2007)	ARL	ARC	-	-	-	-	-	-	-
Suíça	SN 670 143 (1998)	ARC	ARC	≥ 95	-	a)	-	≤ 0,3	-	Não conter
	SN 670 144 (1998)	ARM	ARM	≥ 97		a)	-	≤ 0,3	-	≤ 3
Internacional	RILEM (1994)	AR Tipo 1	ARCE	-	< 100	-	≤ 1	≤ 1	≤ 1	-
		AR Tipo 2	ARC	-	-	< 100	≤ 0,5	≤ 1	≤ 0,5	-
		AR Tipo 3	ARM	> 80 <sup>h)</sup>	< 10	-	≤ 0,5	≤ 1	≤ 0,5	-

Observações:  
a) Incluso no conteúdo de concreto e agregados naturais  
b) Partículas com densidade < 1000kg/m<sup>3</sup>  
c) Incluso no conteúdo de impurezas  
d) Conteúdo de vidro ≤ 2 %  
e) Válido para aplicações em concreto não estrutural  
f) Conteúdo de vidro ≤ 1 %; Conteúdo de Gesso ≤ 2,1 %  
g) Conteúdo de Material Betuminoso Incluso  
h) Conteúdo apenas de agregado natural  
i) Incluso no conteúdo de cerâmica

De forma geral, todas as classificações são guiadas pela proporção de dois conjuntos de materiais principais componentes presentes no AR: Cerâmica; e Concreto e Agregados Naturais. Por outro lado, cada especificação possui critérios próprios para estabelecer estas proporções e definir



denominações para estes agregados. A maioria das normas utiliza o critério de composição de concreto e agregado natural ou apenas concreto mínimo de 90% para que sejam considerados ARC, com exceção da norma Espanhola EHE-08 <sup>(4)</sup> e normas Japonesas <sup>(5)</sup> por já definirem que o conteúdo deverá ser majoritariamente deste material e serem normas específicas para uso em concretos inclusive para fins estruturais.

Com relação à classificação dos ARs Mistos, é possível observar uma tendência em limitar o conteúdo de material cerâmico de 30% a 70%, como são os casos das normas da Austrália <sup>(6)</sup>, Bélgica <sup>(7)</sup>, Inglaterra <sup>(8)</sup>, País Basco <sup>(9)</sup> e Holanda <sup>(10)</sup>. A classificação do AR Cerâmico, apesar de não existir na normatização brasileira, está presente em especificações da Alemanha <sup>(1)</sup> e Bélgica <sup>(7)</sup> através da limitação do conteúdo de concreto de 20% a 40% e da exigência de porcentagens mínimas de cerâmica que variam de 65% a 80%.

A maioria das normas limita o conteúdo de impurezas e contaminantes a 1%. No entanto, os materiais considerados, como metais, papel, plástico, vidro, madeira, gesso, resíduos vegetais, materiais betuminosos entre outros, podem variar por norma / especificação.

## **4.2. Uso para produção de pavimentos**

Todos os documentos estudados permitem o uso de ARs para a execução de camadas granulares de pavimentos diversos, principalmente bases e sub-bases de estradas (Quadro 2). Outro uso comum entre as especificações é o uso do AR em serviços de terraplanagem, aterros, nivelamentos topográficos, enchimentos e obras de drenagens como é o caso das normas Espanholas <sup>(3)</sup> <sup>(9)</sup> <sup>(11)</sup>, Holandesa <sup>(12)</sup>, Suíça <sup>(13)</sup>, Austrália <sup>(14)</sup> e EUA <sup>(15)</sup> <sup>(16)</sup> <sup>(17)</sup>.

A ABNT NBR 15115 <sup>(18)</sup> admite que os ARs tenham no máximo 30% de grãos lamelares. Nesse caso, este valor pode ser comparado com os limites de índice de forma definidos pelas normas da Alemanha <sup>(19)</sup> e Espanha <sup>(3)</sup> <sup>(9)</sup> <sup>(11)</sup>. O Brasil se mostra mais rigoroso em relação aos demais países, seguido da Espanha e, por fim, a Alemanha, que permite até 50%.

Em relação à resistência à fragmentação, os valores permitidos variam consideravelmente nas normativas estudadas. A Espanha <sup>(3)</sup> <sup>(9)</sup> <sup>(11)</sup> define este parâmetro principalmente com base na classificação do tráfego. Para categorias de fluxo de veículos maiores, o limite se torna menor. A Holanda <sup>(12)</sup> e EUA <sup>(15)</sup> <sup>(16)</sup> <sup>(17)</sup> apresentam valores mais altos comparados com outros países, enquanto em sua maioria a variação ocorre entre 30 a 45%.



**Quadro 2 – Requisitos técnicos para AR utilizados como material granular em pavimentação.**

País	Classificação	Aplicações		Índice de Forma (%)	Abrasão Los Angeles (%)	Absorção de Água	Equivalente de Areia	Índice Suporte Califórnia (%)	Teor de Sulfatos	Plasticidade		
Brasil	ARC e ARM	Reforço de subleito		< 3*	-	-	-	≥ 12	≤ 2%	-		
		Sub-base de pavimento e revestimento primário			-	-	-	≥ 20		-		
		Base de pavimento			-	-	-	≥ 60		-		
Alemanha	ARC e ARM	Camadas não ligadas hidraulicamente		≤ 50	≤ 40	≤ 0,5	-	-	-	-		
		Pavimento de Concreto			≤ 32		-	-	-	-		
Austrália	AR Classe I	Pavimentação, serviços de terraplanagem		-	≤ 30	-	-	-	-	LL < 25; IP < 6		
	AR Classe II			-	≤ 45	-	-	-	-	LL < 28; IP < 8		
	AR Classe III			-		-	-	-	-	LL < 35; IP < 15		
EUA	ARC	Bases de Pavimento, acostamentos, aterros		-	≤ 50	-	-	-	≤ 0,3%	LL < 35; IP < 10		
Espanha	ARC e ARM	Bica corrida em camadas de pavimento		≤ 35	T2: ≤ 35 T3 e T4: ≤ 40	-	> 35	-	c) < 0,2% d) < 0,7%	-		
		Serviços de terraplanagem e aterros		-	-	-	> 30	a) > 20 b) > 40		-		
	ARC	Camadas Granulares de pavimento	Bica Corrida Reciclada de Concreto em vias de tráfego T2 a T4		≤ 35	T2: < 35; T3 e T4, Ciclovias e Passeios: < 40	AG: < 7%; AM < 7%;	> 35	> 40	c) < 0,5% d) < 0,7%	-	
	ARM I		Bica Corrida Reciclada Mista I em vias de tráfego T2 a T4			T3 e T4, Ciclovias e Passeios: < 40	AG: < 9%; AM < 12%;	> 30			-	
	ARM II		Sub-base de pavimento Bica Corrida Reciclada Mista II em vias de tráfego T4			T4, Ciclovias e Passeios: < 40	AG: < 11 %; AM < 14%;	> 25			> 20	LL < 25; IP < 6
	ARC	Camadas Granulares de pavimento	Vias de tráfego T0 a T4		≤ 35	T0, T1 e T2: ≤ 35; T3 e T4: ≤ 40	-	T0, T1 e T2: > 40; T3 e T4: > 35	-	≤ 0,5%	-	
	ARC		Vias de tráfego T1 a T4				-		-		-	-
	ARM		Vias de tráfego T1 a T4				-		-		-	-
ARCE	Vias de tráfego T3 e T4		-	-			-		-		-	
Holanda	ARM	Pavimento, terraplanagem e nivelamento de terra		-	≤ 60	-	-	≥ 50	-	-		
Hong Kong	ARC	Sub-base de pavimento		-	-	-	-	≥ 30	≤ 1%	-		

Observações:  
a) Solos selecionados tipo ≥ LL = Limite de Liquidez  
b) Solos selecionados tipo < IP = Índice de Plasticidade



De maneira semelhante, o Índice Suporte Califórnia (ISC) exigido pelas normas também varia de acordo com o uso e a demanda do pavimento. A norma brasileira <sup>(18)</sup> admite diferentes valores de CBR de acordo com uso. Quanto maior a proximidade da camada com a capa de rodagem, maior se tem o valor mínimo de CBR. Na Holanda, a RAW <sup>(12)</sup>, apresenta valores mais altos comparados com as demais normas. Para a Espanha <sup>(3)</sup> <sup>(9)</sup> <sup>(11)</sup>, quando utilizados em terraplanagem e aterros, o ISC deverá ter diferentes valores mínimos de acordo o tipo de solo em que será empregado.

### 4.3. Uso para produção de concreto e argamassas

Os Quadros 3 e 4 comparam os documentos no âmbito da aplicação em concretos, com base na análise dos seus requisitos geométricos, físico-mecânicos e químicos abordados.

Boa parte dos documentos apresentam limites para o conteúdo de finos dos ARs, com exceção da Alemanha <sup>(1)</sup>, Suíça <sup>(2)</sup>, Holanda <sup>(10)</sup>, EUA <sup>(15)</sup> <sup>(16)</sup> <sup>(17)</sup>, Austrália <sup>(6)</sup> e Japão <sup>(1)</sup>. Estes valores, no entanto, variam muito segundo normativa, tipo de agregado e uso. Países como Reino Unido <sup>(8)</sup> <sup>(20)</sup>, Hong Kong <sup>(21)</sup>, Bélgica <sup>(2)</sup> e a especificação do RILEM <sup>(22)</sup> admitem máximos que variam de 3 a 5%, enquanto Brasil <sup>(18)</sup> e Espanha <sup>(3)</sup> impõem limites maiores.

Quanto à densidade mínima permitida, os valores variam de 2000 a 2500 kg/m<sup>3</sup> para ARCs, e de 1500 a 2000kg/m<sup>3</sup> para ARMs. Alemanha <sup>(1)</sup>, Espanha <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(9)</sup>, Holanda <sup>(10)</sup>, Hong Kong <sup>(21)</sup> e Austrália <sup>(6)</sup> estabeleceram mesmos valores mínimos de densidade para o ARC ( $\geq 2000$  kg/m<sup>3</sup>).

Quanto à absorção de água, para ARCs, há um grupo de países mais restritos em suas normas que admitem valores máximos de absorção 5 a 8% (Espanha <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> <sup>(9)</sup>, Japão <sup>(1)</sup>, Austrália <sup>(6)</sup> e Brasil <sup>(18)</sup>), e um grupo mais permissivo que admitem valores máximos de 9 a 20% (Hong Kong <sup>(21)</sup>, Bélgica <sup>(2)</sup>, Alemanha <sup>(1)</sup> e as especificações do RILEM <sup>(22)</sup>). Em relação aos ARMs, de modo geral, todas as especificações são menos rigorosas, os valores de absorção máxima estão entre 8% a 20%.

O teor de sulfatos é abordado em praticamente todas as normas, apenas se diferenciado pelo tipo de ensaio adotado para determinação do parâmetro. Os valores máximos exigidos estão entre 0,8 e 1%, sendo as normativas da Alemanha <sup>(5)</sup> e Espanha <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup> as mais restritivas nesse caso. O limite da ABNT NBR 15116 <sup>(18)</sup> é o único que pode chegar até 1%, visto se tratar de uma norma para concreto sem função estrutural.



**Quadro 3 – Resumo de requisitos dos ARs para aplicação em concretos – classificação e requisitos**

País	Norma	Classificação		Requisitos para o agregado											
		Norma	Unificada	Dimensão Mínima (mm)	Densidade Seca a Forno (kg/m³)	Absorção de água (%)	Teor de Cloretos (%)	Teor de Sulfatos (%)	Teor de finos (%)	Abração Los Angeles (%)	Material passante na peneira de 4mm (%)	Torrões de Argila (%)	Índice de Forma (%)	Compostos de enxofre (%)	
Brasil	ABNT NBR 15116 (2004)	ARC	ARC	-	-	AG ≤ 7 ; AM ≤ 12	≤ 1	≤ 1	AG ≤ 10 ; AM ≤ 15	-	-	≤ 2	-	-	
		ARM	ARM	-	-	AG ≤ 12 ; AM ≤ 17	-	-	AG ≤ 10 ; AM ≤ 20	-	-		-	-	
Alemanha	DIN 4226 - 100 (2002)	Tipo 1	ARC	4 mm	≥ 2000	≤ 10	≤ 0,04	≤ 0,8	-	-	-	-	-	-	
		Tipo 2	ARC		-	≤ 15			-	-	-	-	-		
		Tipo 3	ARCE	-	≥ 1800	≤ 20	-	-	-	-	-	-	-		
		Tipo 4	ARM	-	≥ 1500	-	≤ 0,15	-	-	-	-	-	-		
Austrália	CSIRO HB 155 (2002)	Classe 1A	ARC	4 mm	≥ 2000	≤ 6	-	-	-	-	-	-	-		
		Classe 1B	ARM		-	≥ 1800	≤ 8	-	-	-	-	-	-		
Bélgica	NBN B15-001 (2006)	ARC	ARC	4 mm	≥ 2100	≤ 9	≤ 0,06	≤ 1	≤ 3	-	-	-	-		
		ARM	ARM		-	≥ 1600			≤ 18	-	≤ 5	-	-	-	
Espanha	EHE-08 (2000)	ARC	ARC	4 mm	≥ 2000	≤ 7	≤ 0,05	≤ 0,08	< 10	≤ 40	≤ 5	≤ 0,6	-	-	
	IHOBE - País Basco (2011)	ARM	ARM	-	≥ 2100	≤ 12	-	-	-	≤ 50	-	-	-	-	
	GEAR - RT - 04 (2012)	ARH	ARC	-	-	≤ 11%	≤ 0,05	≤ 0,8	≤ 15 <sup>a)</sup>	≤ 50	-	-	-	≤ 35	≤ 1%
		ARMh	ARC	-	-										
		ARMc	ARM	-	-										
	GEAR - RT - 05 (2012)	ARH	ARC	4 mm	-	-	≤ 0,05	≤ 0,8	< 10	Concreto Estrutural: ≤ 50%	≤ 5	-	Estrutural ≤ 0,25	≤ 35	-
ARMh		ARC	-		Estrutural ≤ 9	≤ 0,25									
ARMc	ARM	-	-	Não Estrutural ≤ 12	-										
EUA	FDOT(2017); TXDOT(2014); MDOT(2012)	ARC	ARC	4 mm	-	-	-	-	-	≤ 40	-	≤ 0,25	-	-	
Holanda	NEN 5905 (2005)	ARC	ARC	-	≥ 2000	-	≤ 0,05	≤ 1	-	≤ 40	-	-	-	≤ 1	
		ARM	ARM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Hong Kong	WBTC Nº 12 (2002)	ARC	ARC	4 mm	≥ 2000	≤ 10	≤ 0,05	≤ 1	< 4	-	≤ 5	-	-	-	
Inglaterra	BS 8500-2 (2002)	ARC	ARC	4 mm	-	-	-	≤ 1	< 5	-	-	-	-	-	
		AR	ARCE		-	-	-	c)	< 3	-	-	-	-	-	
	BRE DIGEST 433(1998)	AR I	ARCE	4 mm	≥ 2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		AR II	ARC		-	-	≤ 1	-	-	-	-	-	-		
AR III	ARM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Japão	BCSJ (1977)	AR	ARM	-	≥ 2200	AG ≤ 7 ; AM ≤ 13	-	-	-	-	-	-	-	-	
	JIS A 5021 (2005)	ARH	ARC	-	≥ 2500	AG ≤ 3 ; AM ≤ 3,5	≤ 0,04	-	-	≤ 35	-	-	-	-	
	JIS A 5022 (2006)	ARM	ARC	-	AG ≥ 2300; AM ≥ 2200	AG ≤ 5 ; AM ≤ 7	-	-	-	-	-	-	-	-	
	JIS A 5023 (2007)	ARL	ARC	-	-	AG ≤ 7 ; AM ≤ 13	-	-	-	-	-	-	-	-	
Suíça	OT 70085 (2006)	ARC	ARC	-	-	-	≤ 0,12	≤ 1	-	-	-	-	-	-	
		ARM	ARM	-	-	-			-	-	-	-	-		
Internacional	RILEM (1994)	AR Tipo 1	ARCE	4 mm	≥ 1500	≤ 20	-	-	< 5	-	-	-	-	-	
		AR Tipo 2	ARC		≥ 2000	≤ 10	-	≤ 1		-	-	-			
		AR Tipo 3	ARM		≥ 2000	≤ 3	-	-		-	-	-			

AG: Agregado Graúdo AM : Agregado Miúdo  
a) No caso de pré-fabricados de blocos e bancos ≤ 8%  
b) No caso de pré-fabricados de blocos e bancos ≤ 10%  
c) Limites devem ser determinados de forma isolada, caso a caso



**Quadro 4 – Resumo de requisitos dos ARs para aplicação em concretos – aplicação e condições de uso**

País	Norma	Classificação		Aplicação	Substituição (%)		Condições de uso	Resistência Máxima (ou Classe) do Concreto Produzido			
		Norma	Unificada		Agregado Graúdo	Agregado Miúdo					
Brasil	ABNT NBR 15116 (2004)	ARC	ARC	Não estrutural e argamassas	≤ 100		-	C15			
		ARM	ARM				-				
Alemanha	DIN 4226 - 100 (2002)	Tipo 1	ARC	Estrutural	≤ 45	0	Classes de exposição X0, XC1 a XC4, XF1-XF3, XA1. Não é permitido o uso em concreto protendido	35 MPa			
		Tipo 2	ARC		≤ 35	0					
		Tipo 3	ARCE	Não estrutural e argamassas	-		Concreto sem função estrutural e argamassas	-			
		Tipo 4	ARM		-			-			
Austrália	CSIRO HB 155 (2002)	Classe 1A	ARC	Concreto	≤ 30	0	Concretos estruturais com ajustes de dosagens, permeabilidade e propriedades e encolhimento	40 MPa			
		Classe 1B	ARM		≤ 100	0		25 MPa			
Bélgica	NBN B15-001 (2006)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 20	0	Classes de exposição X0 e XC1	C30/C7			
		ARM	ARM	Não estrutural	≤ 100	0	-	C16/20			
Espanha	EHE-08 (2000)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 20%	0	Exceto em concreto protendido	40 MPa			
	IHOBE - País Basco (2011)	ARM	ARM	Não estrutural	≤ 100		-	C15			
		ARH	ARC				Pré fabricados de Concreto		-	Condições climáticas favoráveis e sem exposição ao congelamento e descongelamento	-
		ARMh	ARC						20 a 100		-
	ARMc	ARM	-	-	-						
	GEAR - RT - 05 (2012)	ARH	ARC	Misturas para Concreto	-		-	Estrutural: 30 MPa; Não estrutural: 20 MPa			
		ARMh	ARC		-		-				
ARMc		ARM	-		-						
EUA	FDOT(2017); TxDOT(2014); MDOT(2012)	ARC	ARC	Não estrutural	-	-	-	-			
Holanda	NEN 5905 (2005)	ARC	ARC	Concreto	≤ 100	-	Condições climáticas favoráveis e ambientes não agressivos	C40/C50			
		ARM	ARM		-			20 MPa			
Hong Kong	WBTC Nº 12 (2002)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 20	0	-	35 MPa			
				Não estrutural	≤ 100	0	-	20 MPa			
Inglaterra	BS 8500-2 (2002)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 100	0	Classes de exposição X0, XC1, XC3, XC4, XF1, DC-1	C40/50			
		AR	ARCE	Não estrutural	≤ 20	0		C16/20			
	AR I	ARCE	-		0	-	C20				
	BRE DIGEST 433(1998)	AR II	ARC		Estrutural	-	0	-	C35		
		AR III	ARM	Concretos	≤ 20	0	-	-			
Japão	BCSJ (1977)	AR	ARM	Não estrutural	≤ 100		Elementos de fundação	18 MPa			
	JIS A 5021 (2005)	ARH	ARC	Estrutural	-		-	45 MPa			
	JIS A 5022 (2006)	ARM	ARC		-		Não expostos ao gelo e degelo	-			
	JIS A 5023 (2007)	ARL	ARC	Não estrutural	≤ 100		-	-			
Suíça	OT 70085 (2006)	ARC	ARC	Concreto	≤ 100		-	-			
		ARM	ARM				-	-			
Internacional	RILEM (1994)	AR Tipo 1	ARCE	Concreto	≤ 100	Não recomendado	Ambientes secos e úmidos sem exposição química agressiva	C16/20			
		AR Tipo 2	ARC					C50/60			
		AR Tipo 3	ARM					Ilimitado			

AG: Agregado Graúdo AM : Agregado Miúdo

a) No caso de pré-fabricados de blocos e bancos ≤ 8%

b) No caso de pré-fabricados de blocos e bancos ≤ 10%

c) Limites devem ser determinados de forma isolada, caso a caso

Observa-se que a variação de limites em alguns parâmetros analisados ocorre por influência da aplicação prevista para o concreto em norma (uso estrutural ou não estrutural, e classes de



resistência permitidas). Assim, nos Quadros 3 e 4 as especificações estudadas são comparadas de acordo com a aplicação de concreto e condições de uso definidas pelas normas.

Muitas normatizações não permitem agregados miúdos para uso em concreto, estabelecendo a dimensão mínima igual a 4 mm. Isso pode ser atribuído a usual dificuldade das linhas de produção em separar contaminantes existentes nas frações mais finas. Quanto ao limite de substituição dos agregados naturais por ARs, a maioria das normatizações, quando indicadas para concretos estruturais, só permitem a substituição de 20% do agregado graúdo, mesmo que se trate de ARC. Observa-se, contudo, alguns documentos mais permissivos, como a norma alemã DAfStb <sup>(1)</sup>, que permite o uso de até 45% de AR, a depender do tipo de agregado, classe de exposição e limites de resistência, e a inglesa BS 8500-2 <sup>(20)</sup>, que permite a substituição na fração graúda em até 100%.

A especificação RILEM <sup>(22)</sup> mesmo que tenha sido um dos primeiros documentos elaborados a respeito dos agregados reciclados, já permitia a substituição de até 100% para ambientes secos e úmidos sem exposição química agressiva, e inclusive classes de resistência altas para o ARC. No entanto, isso pode ser atribuído ao fato da especificação propor fatores de correção para as propriedades dos concretos reciclados.

Boa parte das especificações possui maior cuidado em relação aos ataques químicos, restringindo o uso a ambientes não agressivos quimicamente. As classes de exposição mais permitidas remetem a ambientes internos ou na terra sem exposição ao congelamento, secos ou no máximo úmidos, sem risco de corrosão ou ataque químico.

Em relação ao uso em argamassas, identificaram-se poucas especificações e normas que abordam o tema com requisitos e diretrizes específicas. A grande maioria dos documentos estudados, por serem direcionados ao âmbito de aplicação em concretos, excluem o uso da fração miúda. A análise que pode ser feita neste caso é que as normas que não restringem o uso da fração miúda são permissíveis ao uso da areia reciclada tanto para concreto quanto para argamassas. No entanto muito destes documentos não diferenciam seus requisitos exigidos para concretos ou argamassas, como é o caso das normas do Brasil <sup>(18)</sup>, Alemanha <sup>(1)</sup>, Suíça <sup>(2)</sup>, Japão <sup>(1)</sup> e Holanda <sup>(10)</sup>.

O único documento encontrado que apresentou algumas recomendações para o uso da areia reciclada de forma diferenciada foi a prescrição técnica da Bélgica PTV 406 <sup>(7)</sup>.



## 5. CONCLUSÕES

As normas brasileiras apresentam um alinhamento frente ao cenário de especificações observado. Contudo, nota-se forte lacuna no desenvolvimento de normas mais específicas, voltadas a direcionar o usuário na execução de produtos com AR, desde para usos mais simples como material granular para pavimentação até usos mais nobres como concreto estrutural.

Quanto ao uso de ARs como material granular em pavimentos, os documentos analisados indicam maior aceitação de uso do AR na construção de pavimentos que não sejam submetidos a elevadas cargas ou tráfegos pesados, bem como em terraplanagem, drenagens, enchimento de valas e aterros.

As normas estudadas a respeito do uso do AR em concreto, por sua vez, apresentam muitas semelhanças quanto aos requisitos físicos, mecânicos e químicos exigidos, sendo as aplicações consideradas (concretos estruturais, sem função estrutural, pré-fabricados, entre outros) o que as tornam mais permissivas ou restritivas. Diante disto, uma das formas de regular o uso de ARs na produção de concreto consiste em estabelecer limites, tanto na taxa de incorporação de AR, quanto nas condições de uso deste concreto, para garantir que o concreto resultante basicamente seja equivalente ao material convencional. Outra vertente consiste em assumir que existem, de fato, diferenças entre o desempenho do concreto convencional e do concreto reciclado, e utilizar coeficientes corretivos nos desenvolvimentos dos projetos, como proposto pela RILEM <sup>(18)</sup>, que permitem levar em conta a influência da densidade dos agregados sobre a força e características de deformação do concreto.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à ABRECON pelo apoio a pesquisas relacionadas à gestão e reciclagem de RCC.

## 7. REFERÊNCIAS

1. GONÇALVES, P.; BRITO, J. **Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications**. In: Magazine of Concrete Research, v. 62, n. 5, p. 339–346, 2010.
2. TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M; EVANGELISTA, A. C. J. **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)**. Construction and Building Materials, v. 172, p. 272–292, 2018.
3. GRÊMIO ESPANHOL DE EMPRESAS DE RECICLAGEM E DEMOLIÇÃO (GERD). **Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición**. Madrid, 2012.



4. MINISTERIO DE FOMENTO. **EHE-08**: Instrucción de Hormigón Estructural. Madrid, 2008.
5. MCNEIL, K; KANG, T. H. **Recycled Concrete Aggregates: A Review**. In: International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 7, n. 1, p. 61–69, 2013.
6. COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION. **HB 155**: Guide to the use of recycled concrete and masonry materials. 2002.
7. ORGANISME IMPARTIAL DE CONTRÔLE DE PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION. **Prescriptions Techniques PTV 406**: Granulats de debris de demolition et de construction recycle. Bruxelles, 2016.
8. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **BRE Digest 433**: Recycled Aggregates. London, 1998.
9. SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL GOBIERNO VASCO. **Usos de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición: Investigación prenormativa**. 2011.
10. PELLEGRINO, C; FALESCHINI, F. **Sustainability Improvements in the Concrete Industry**. [s.l.: s.n.], 2016.
11. AGENCIA DE OBRA PÚBLICA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA. **Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCC) de Andalucía Central**. Andalucía, 2015.
12. GRÊMIO ESPANHOL DE EMPRESAS DE RECICLAGEM E DEMOLIÇÃO. **Assistencia técnica para el estudio sobre la utilización de áridos sobre la utilización de áridos reciclados en la construcción de carreteras**. Informe 3: La utilización de áridos reciclados en la construcción de carreteras, em Alemania, Países Bajos, Austria y Suiza. Madrid, 2005.
13. SWISS ASSOCIATION OF ROAD AND TRANSPORTATION EXPERTS (VVS). **SN 670 062**: Recyclage; généralités. Zurich, 1998.
14. INSTITUTE OF PUBLIC WORKS ENGINEERING AUSTRALIA. **Specification for Supply of Recycled Material for Pavements, Earthworks and Drainage**. 2010.
15. MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard Specifications for Construction**. Michigan, 2012.
16. TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Specification 421: Concreto with hydraulic cement**. Texas, 2014.
17. FLÓRIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard specifications for construction of roads and bridges**. Flórida, 2017.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
19. GERMANY. **TL GESTEIN-STB**: Technical Terms of Delivery for aggregates in road construction. Germany, 2004.
20. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8500-2**: Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Specification for constituent materials and concrete. 2006.
21. HONG KONG. **WBTC No. 12/2002**: Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates. Hong Kong, 2002.
22. RILEM. TC 121-DRG, Specifications for concrete with recycled aggregates. **Material and Structures**, vol. 27, 1994.



# SITUAÇÃO E EVOLUÇÃO DO SETOR DE RECICLAGEM DE RCD NO BRASIL

JADI TOSTA VENTIN IGLESIAS (1); ELAINE PINTO VARELA  
ALBERTE (1)  
(1) Universidade Federal da Bahia

## RESUMO

Apesar da Construção Civil se destacar como um dos setores econômicos mais importantes e influentes do Brasil, a reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) ainda está em processo de consolidação. Algumas regiões do país ainda não possuem usinas de reciclagem, e esta carência por infraestrutura compromete a destinação correta dos resíduos. Assim, entende-se necessário conhecer melhor as características e necessidades desse setor para fomentar sua ampliação e consolidação. O artigo analisa o panorama atual e evolutivo da relação entre demanda e consumo de agregados naturais e reciclados, a partir dos resultados obtidos de levantamento de dados e de pesquisa setorial da Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON) entre 2017 e 2018. A pesquisa tipo survey foi feita com o apoio de questionários disponibilizados on-line, e considerou e analisou dados de 96 usinas de reciclagem brasileiras. Os dados analisados (demandas de produção, tendências de crescimento e qualidade do material, entre outros.) foram cruzados com dados de outras associações produtoras e de fontes como o IBGE. Os resultados indicam uma expectativa/necessidade de crescimento do mercado, além de uma necessidade de melhora tecnológica dos processos de triagem e controle de qualidade do produto final.

**Palavras-chave:** RCD, reciclagem, agregados reciclados.

## SITUATION AND EVOLUTION OF CDW RECYCLING SECTOR IN BRAZIL

### ABSTRACT

Although Construction Sector stands out as one of the most important and influential economic sectors in Brazil, the recycling of construction and demolition waste (CDW) is still in the process of consolidation. Some regions of the country still do not have recycling plants, and this lack of infrastructure compromises the correct disposal of waste. Therefore, it is necessary to know better the characteristics and needs of this sector to promote its expansion and consolidation. The article analyzes the current and evolutionary overview between demand and consumption of natural and recycled aggregate, based on the results obtained in a sectoral survey of the Brazilian Association for the CDW Recycling (ABRECON) between 2017 and 2018. This survey was made with the support of questionnaires available online, and considered and analyzed data from 96 Brazilian recycling plants. The data analyzed (production demands, growth trends and material quality, among others.) were crossed with results from other producer associations and sources such as IBGE. The results indicate an expectation / need for market growth, as well as a need for technological improvement of the final product selection and quality control processes.

**Key-words:** CDW, recycling, recycled aggregates.



## 1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduo global cresce em uma velocidade maior do que os níveis de urbanização (Wahi et al.<sup>(1)</sup>). Neste sentido, diversos setores econômicos tem buscado formas de se alinharem a redução do impacto humano ao meio ambiente, em especial o setor da Construção Civil.

Dentre os setores econômicos industriais do Brasil, a indústria da construção civil é amplamente conhecida por ser um dos pilares do desenvolvimento econômico do país. Mesmo com a retração deste setor sua contribuição no Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil em 2017 representou 5,2% do panorama industrial do país que fica em torno de 24,4%, segundo CBIC (2018)<sup>(2)</sup>. A grande importância deste setor vai desde a sua participação efetiva na economia, atrelada a geração de empregos, bem como ao destaque da sua cadeia produtiva e impactos que são gerados pelo alto consumo de matérias primas e pela elevada geração de resíduos, comumente descartada inadequadamente.

Um dos maiores desafios para tornar o setor mais sustentável perpassa pela diminuição do consumo de matéria prima e a busca pelo uso de materiais mais sustentáveis. Segundo a ANEPAC (Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil)<sup>(3)</sup>, no ano de 2014 estima-se que foram produzidos cerca de 45 bilhões de toneladas de agregados naturais no mundo. Por outra parte, de acordo com ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais)<sup>(4)</sup>, foram coletados no Brasil 45 milhões de toneladas/ano de RCD em 2017.

Segundo Alberte<sup>(5)</sup>, a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) para aplicação como agregados reciclados promover diversos benefícios ao meio tais como redução no volume de extração de matéria-prima, consumo de energia, emissões de CO<sub>2</sub>, poluição gerada, disposição inadequada de resíduos potencialmente recicláveis em aterros sanitários e custos municipais pelo tratamento desses resíduos. Adicionalmente, Alberte<sup>(5)</sup> destaca que esta atividade pode promover o fechamento do ciclo produtivo da construção civil, já que o produto final desta atividade é inserido novamente na mesma indústria como matéria prima.

Miranda et al.<sup>(6)</sup> afirma que a atividade de reciclagem de RCD no Brasil sua primeira usina de reciclagem sendo implementada apenas em 1991. Segundo Contreras et al.<sup>(7)</sup> estima-se que a produção nacional de RCD seja de aproximadamente 500kg/ano per capita. Sendo necessário ressaltar o fato de que hoje no país boa parte desse resíduo não possui a destinação adequada,



mas que políticas de regulamentação e incentivo aos poucos estão se refletindo na implantação de indústrias de reciclagem de resíduos e aproveitamento deste material dentro do próprio ciclo de construção.

Ao longo dos anos, a indústria estabeleceu-se com 16 usinas até o ano de 2002 e ganhou folego com a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº12.3056<sup>(8)</sup>) e a ABRECON (Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição)<sup>(9)</sup> estima que hoje existam cerca de 360 usinas em atuação no país. Apesar do crescimento é necessário ter em vista que este é um campo de atuação em consolidação que ainda não possui a capacidade de atendimento das necessidades nacionais. Assim, entende-se necessário conhecer melhor as características e necessidades desse setor para a identificação de diretrizes que busquem fomentar sua ampliação e consolidação.

Nesse sentido, o presente trabalho objetiva analisar o panorama atual e evolutivo do setor de reciclagem de RCD do país a partir do cruzamento de dados produzidos pela ABRECON, ANEPAC ABRELPE e IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) identificando características de cada região do país, perfil das usinas, qualidade do material recebido e relação quanto a políticas públicas locais. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para o desenvolvimento de diretrizes e ações que visem o crescimento e consolidação sustentável do mercado de reciclagem de RCD no país.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Alguns autores trabalham com estimativas e dados de caracterização do setor de utilização de agregados naturais, reciclados e da geração de resíduos em construção em um nível regional. Segundo Akhtar e Sarmah<sup>(10)</sup> a taxa de reciclagem de RCD varia entre 7% a mais 90% em alguns países. A reutilização de resíduos não melhora apenas a diminuição da utilização da matéria prima original, mas também movimentam economicamente o setor da construção civil. Apenas nos EUA a utilização de RCD contribuiu com mais de 7 bilhões de dólares, sendo que 67% dos resíduos são de concreto, e na Coreia do Sul foram mais 2,1 bilhões de dólares em gerenciamento de resíduos, atingindo níveis de 98% reciclagem com 50% do material correspondendo a concreto e asfalto.

De acordo com García et al.<sup>(11)</sup>, no México a legislação local estabelece um plano de gestão de RCD que objetiva promover o seu uso e minimizar o descarte inadequado. Neste plano, as cidades devem iniciar promovendo uma reutilização de no mínimo 30% dos resíduos tipo A (concreto,



argamassa e derivados) gerados no primeiro ano, aumentando 15% ao ano até atingir a marca de 100%. Utilizando dados entre 2008-2012, foi possível estimar que a demanda de agregado na região metropolitana da Cidade do México é superior a capacidade de produção das áreas adjacentes.

Para Yang et. al<sup>(12)</sup>, que analisa dados entre 1980-2010 da Coréia do Sul, é possível perceber um aumento de seis vezes o volume de resíduos de construção e demolição produzidos na região entre os anos 1996 e 2010, apesar do grande crescimento de produção de resíduos houve também uma grande política de reciclagem. Sendo assim, em 1996 cerca de 40% desses resíduos eram encaminhados para aterro e em 2010 apenas 1% do material tem essa destinação. Dentre as perspectivas futuras do país está não apenas a diminuição da quantidade de material encaminhado para aterro, mas também uma diminuição da taxa de produção de resíduos a uma taxa de 3,8% entre 2017 e 2020.

Por fim, Tam et al <sup>(13)</sup> realizaram uma análise acerca dados de geração e reciclagem de RCD de diferentes países e observaram uma enorme variação no nível de reciclagem e recuperação desses países. Enquanto o Brasil apresentou uma taxa de reciclagem de 21%, países como Espanha, Japão e Holanda (98%) apresentaram valores muito superiores (79%, 81% e 98%, respectivamente).

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho enquadra-se como um levantamento de dados de caráter descritivo. Segundo Filippini<sup>(14)</sup>, este tipo de pesquisa é realizada para descrever um certo comportamento ou fenômeno dentro de uma população, sendo que a sua finalidade não está no desenvolvimento de teorias, embora através dos fatos descobertos possam ser traçadas teorias. Compreende também em um levantamento de dados bibliográficos através de publicações científicas e institucionais.

O levantamento descritivo utiliza como base de informação os dados obtidos na Pesquisa Setorial ABRECON 2017-2018. Através de uma survey realizada com apoio de um questionário online, a ABRECON<sup>(9)</sup> analisou dados de 96 indústrias com atividades de reciclagem em RCD instaladas no país entre junho de 2017 e março de 2018. A pesquisa consistiu em 48 perguntas: 15 de caracterização, 14 sobre o mercado de resíduos, 13 sobre características de produção da usina e 6 perguntas sobre qualidade dos resíduos recebidos e do agregado produzido.

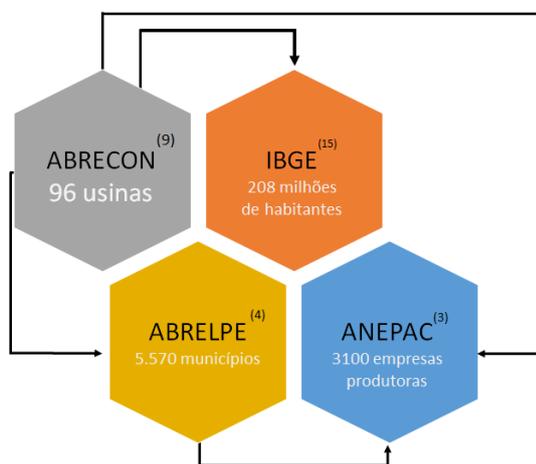


Para análise do panorama nacional, os resultados desta pesquisa foram extrapolados para o valor estimado de 360 usinas situadas no país, conforme estimativa informada pela própria ABRECON.

Os dados desta pesquisa setorial foram, então, cruzados com outras fontes de informações setoriais. Os dados de censo demográfico realizados pelo IBGE foram adotados para se analisar o panorama evolutivo da densidade demográfica do país e, por consequência, da geração de RCD, tendo em vista indicadores de geração per capita de RCD anuais. Para tal, utilizou-se a informação mais atualizada de 2018, na qual se constatou um panorama da realidade brasileira para uma estimativa de 208 milhões de habitantes. Os dados de relatórios e panoramas divulgados pela ABRELPE abrange informações de todos os 5.570 municípios brasileiros, e permitiu analisar o panorama evolutivo da destinação de RCD no país. Finalmente, dados produzidos pela ANEPAC, que disserta sobre a produção de 3100 empresas produtoras de agregados, permitiram analisar o panorama evolutivo da demanda de agregados para o setor da Construção Civil.

A Figura 1 apresenta uma estrutura esquemática que representa e inter-relaciona as fontes de informação setorial trabalhadas neste estudo, indicando o universo representativo de cada fonte de dados.

Figura 1: Fonte e universo representativo dos dados analisados



Fonte: Os autores

A partir do cruzamento desses dados, foi possível realizar uma análise do mercado a partir das capacidades produtivas e o potencial de absorção do produto reciclado frente as demandas de consumo do setor por região. Além de traçar um perfil do material recebido e das características dos municípios que possuem atividade de reciclagem de RCD.

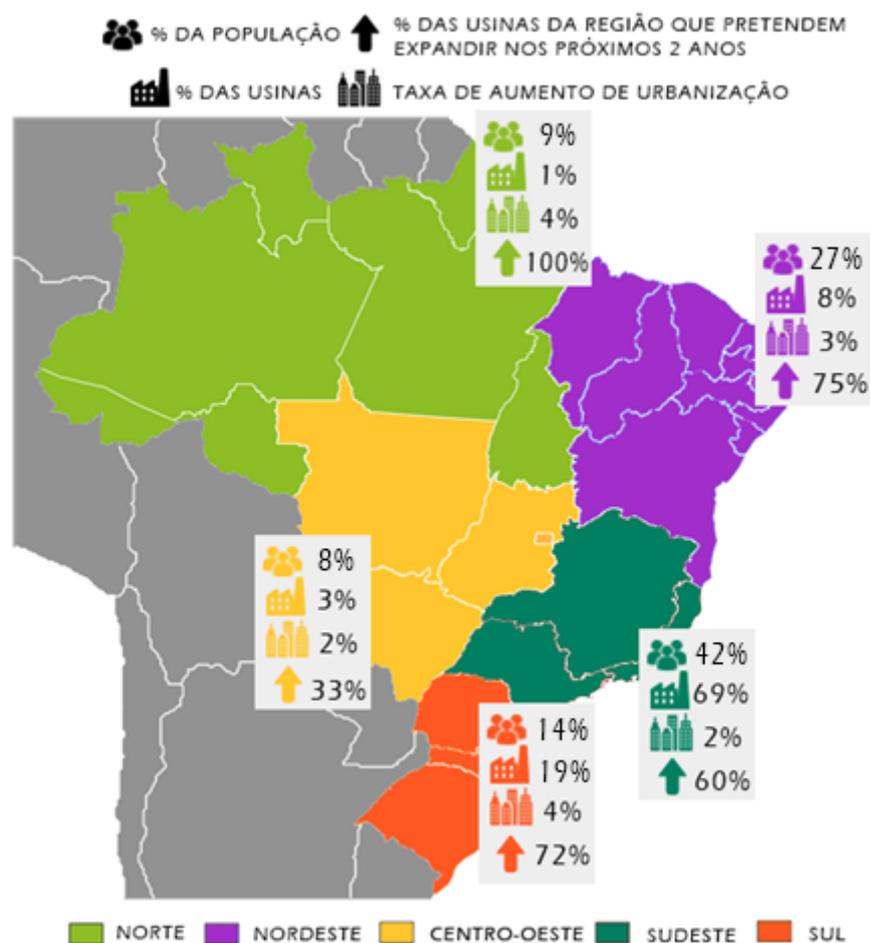


## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise do mercado

No que se refere a distribuição de usinas no país (Figura 2), pode-se perceber que a região sudeste apresenta maior concentração de usinas, somando 69% do total de usinas do país, compatível com maior contingente populacional (42%), em contrapartida as regiões norte e centro-oeste que apresentam os menores números de habitantes, também possuem o menor número de usinas. As regiões norte e sul que possuem as maiores taxas de aumento da urbanização entre 2000-2010, também possuem elevada porcentagem de empresas que responderam positivamente a pesquisa da ABRECON<sup>(9)</sup> sobre planos de expansão para os próximos 2 anos (porcentagem relativa ao total de usinas por região).

Figura 2: População, usinas de reciclagem de resíduos, urbanização e tendência de expansão das usinas



Fonte: Os autores com dados do IBGE<sup>(15)</sup> e da ABRECON<sup>(9)</sup>



Apesar dos incentivos legislativos como plano de manejo de resíduos local, o que pode-se perceber é que o volume de agregado reciclado (AR) comercializado ainda é muito inferior a um por cento do volume total de agregado natural (AN) do país, independente da região, não ultrapassando a marca de 1% (Quadro 1).

**Quadro 1: Consumo de agregado natural (AN) e produção de agregado reciclado (AR)**

Região	Consumo AN (toneladas/ano) (ANEPAC <sup>(3)</sup> )	Consumo AN (kg/dia)	Consumo AN (m <sup>3</sup> /dia)	Volume AR produzido (m <sup>3</sup> /mês) (ABRECON <sup>(9)</sup> )	Volume AR produzido (m <sup>3</sup> /dia)	Volume AR produzido (m <sup>3</sup> /dia) / Consumo AN (m <sup>3</sup> /dia)
Norte	52.700.000	144.383.561,6	96.255,7	240,0	8,0	<1%
Nordeste	154.300.000	422.739.726,0	281.826,5	35.400,0	1.180,0	<1%
Centro-oeste	67.500.000	184.931.506,8	123.287,7	12.240,0	408,0	<1%
Sudeste	347.000.000	950.684.932,0	633.790,0	159.060,0	5.302,0	<1%
Sul	119.500.000	327.397.260,3	218.264,8	24.960,0	832,0	<1%

\* Considerando a massa específica do agregado reciclado 1500 kg/m<sup>3</sup> (Angulo<sup>(17)</sup>)

Mesmo se levarmos em consideração a capacidade produtiva máxima dessas regiões (Quadro 2) percebe-se que a contribuição do agregado reciclado para as construções ainda é muito pequena e carece de expansão. Por outro lado, pode-se observar o grande potencial da disponibilidade de material visto que o volume de agregados utilizados não ultrapassa 3,5% do volume de resíduos de construção coletados, guardada as devidas proporções de que nem todo RCD é matéria prima para agregado reciclado. No que se refere ao desempenho das regiões pode-se perceber tanto um volume de produção de resíduos per capita mais elevado na região centro-oeste, como um volume de consumo de agregados per capita maior nesta região, seguida pela região sudeste.

**Quadro 2: RCD coletado, consumo de AN e capacidade máxima instalada de AR**

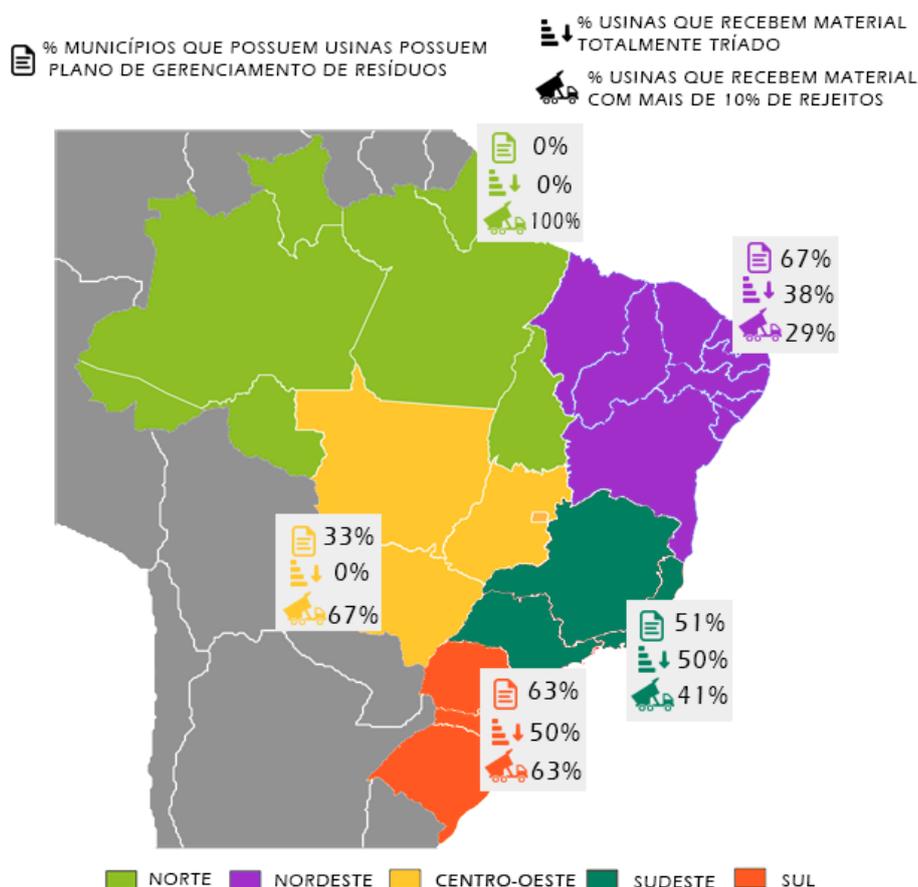
Região	Habitantes (IBGE <sup>15</sup> )	RCD coletado (m <sup>3</sup> /per capita/dia) (ABRELPE <sup>4</sup> )	Consumo AN (m <sup>3</sup> /per capita/dia) (ANEPAC <sup>3</sup> )	Consumo AN / RCD coletado (%)	Capacidade máxima instalada AR (m <sup>3</sup> /dia) (ABRECON <sup>(9)</sup> )
Norte	15.864.454	0,17	0,006	3,5	25
Nordeste	53.081.950	0,29	0,005	1,7	9.400
Centro-oeste	14.058.094	0,56	0,009	1,6	5.317
Sudeste	80.364.410	0,49	0,008	1,4	60.674
Sul	27.386.891	0,37	0,008	2,2	2.306



## 4.2 Perfil quanto planejamento e qualidade dos resíduos

Do ponto de vista dos resíduos recebidos uma das informações que podemos perceber do setor de reciclagem de resíduos se relaciona incentivos legislativos locais como a existência de Planos municipais de gestão de resíduos de construção (Figura 3). Pode-se perceber que as regiões que possuem mais usinas em municípios com planos de resíduos (Nordeste, Sudeste e Sul) tem mais assertividade em receber material totalmente triado. Por outro lado, podemos perceber também que as regiões Norte e Centro-oeste apresentam maior quantidade de usinas que recebem material com teor de rejeitos superior a 10%, visto que nenhuma usina das que responderam a pesquisa conseguem receber material totalmente triado.

Figura 3: Perfil dos municípios quanto a existencia de plano de gerenciamento de resíduos e preferencial de agregados e qualidade do material recebido



Fonte: Os autores com dados da ABRECON<sup>(9)</sup>



## 5. CONCLUSÕES

Por meio de análises realizadas e dos resultados obtidos, percebeu-se que apesar dos incentivos legislativos nacionais e locais ainda há muito espaço para a expansão do setor, visto que a demanda por agregados é extremamente elevada (741 milhões de toneladas anuais) e a produção de resíduos de construção e demolição também (45 milhões de toneladas anuais), destaca-se o potencial da região centro-oeste que demonstra a maior taxa de geração de resíduos per capita (0,56m<sup>3</sup>/dia).

Corroborando esta informação, observa-se uma perspectiva de ampliação nos próximos 2 anos por parte de indústrias de agregado reciclado do país, em especial às situadas na região Norte, setor que possui atualmente a menor produção per capita de agregado reciclado do país (8m<sup>3</sup>/dia), segundo os dados analisados. Destaca-se também o potencial da região Centro-oeste que demonstra a maior taxa de geração de resíduos per capita (0,64m<sup>3</sup>/dia).

No que se refere ao perfil dos resíduos, as regiões que possuem mais usinas em municípios com planos de resíduos (Nordeste, Sudeste e Sul) tem mais assertividade em receber material totalmente triado. Por outro lado, pode-se concluir que as demais regiões apresentam maior quantidade de usinas que recebem material com teor de rejeitos superior a 10%.

Percebe-se a importância da implantação de políticas públicas municipais em todo país para um incentivo à gestão de resíduos e ao utilização de agregados reciclados em obras públicas e privadas, de modo a direcionar melhor o desenvolvimento e consolidação do mercado de reciclagem de RCD no país.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a ABRECON pelo fornecimento de dados e apoio institucional no suporte de pesquisas relacionadas a RCD.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WAHI, N.; JOSEPH, C.; TAWIE, R.; IKAU, R. **Critical Review on Construction Waste Control Practices: Legislative and Waste Management Perspective**. 2016. Procedia Social and Behavioral Science. 224, 2016. In: 6th International Research Symposium in Service Management, 2015, Sarawak.



2. CBIC. PIB Brasil e Construção Civil. PIB e Investimento. 2018. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>> Acesso em: 29 de janeiro de 2019.
3. ANEPAC. **O mercado de agregados no Brasil**. 2015. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/361747665/Relatorio-Mercado-Anepac-pdf>>. Acessado em 22 de maio de 2019.
4. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais São Paulo, 2017.
5. ALBERTE, E. P. V. **Evaluación de la Sostenibilidad Ambiental de Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición**. Barcelona, 2012. Tese (Doutorado) - Departament de Projectes d'Enginyeria, Universitat Politècnica de Catalunya.
6. MIRANDA, L.F.R.; ÂNGULO, S.C.; CARELI, E.D. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.9, n.1, p.57-71, jan./mar. 2009.
7. CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S.R.; LUCAS, M.C.; LIMA, L.C.N.; CARDOSO, D.S.L.; DA SILVA; G.A.C.; GREGÓRIO, G.C.; DE SOUZA, A.E.; DOS SANTOS, A. **Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study)**. Construction and Building Materials, 123, 2016. 594-600.
8. BRASIL, **Lei N° 12.305** de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).
9. ABRECON (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO). **Pesquisa Setorial 2017/2018**. São Paulo: ABRECON, 2018.
10. AKHTAR, A. SARMAH, A.K. **Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective**. Journal of Cleaner Production. 180. 2018. 876-887.
11. GARCÍA, F.P.; MARTÍNEZ, Y.R.; SANDOVAL, O.A.A.; MARTÍNEZ, A.J.G. **Recovery of Waste of Construction, Demolition and Mining Tailings**. International Journal of Applied Science and Technology. Vol. 2 No. 7; August 2012.
12. YANG, W.; PARK, J.; PARK, S.; SEO, Y. **Past, present and future of waste management in Korea**. J Mater Cycles Waste Manag (2015) 17:207-217.
13. TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M; EVANGELISTA, A. C. J. **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017)**. Construction and Building Materials, v. 172, p. 272-292, 2018.
14. FILIPPINI, R. **Operations management research: some reflections on Evolution, models and empirical studies in OM**. International Journal of Operations & Production Management, v.17, n. 7, p. 655-670, 1997.
15. IBGE. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2018**. IBGE, 2018. Disponível em:<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2018/estimativa\\_TCU\\_2018\\_20190213.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_TCU_2018_20190213.pdf)> . Acessado em: 20 de agosto de 2019
16. ÂNGULO, S.C.; **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese de doutorado. São Paulo, 2015.



## **A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE SOBRE A GESTÃO E RECICLAGEM DE RCD EM SALVADOR (Bahia - Brasil)**

JADI TOSTA VENTIN IGLESIAS (1), ELAINE PINTO VARELA  
ALBERTE (1), ALEX PIRES CARNEIRO (1)  
(1) Universidade Federal da Bahia

### **RESUMO**

A Construção Civil é responsável por grandes impactos ambientais, seja pelo consumo de materiais ou pela geração de resíduos de construção e demolição (RCD). A aplicação do conceito de Economia Circular (EC) à esta indústria é fundamental, visto que este pressupõe a ruptura do modelo econômico linear (extrair, transformar e descartar) para o uso de um modelo cujos materiais são desenvolvidos para retornarem de forma eficiente à linha de produção. Possui, assim, alto potencial para resolver os desafios ambientais do setor, além de abrir oportunidades de mercado e crescimento econômico, pois prevê novas tecnologias, processos, serviços e modelos de negócios. Este artigo busca analisar a situação e evolução da Economia Circular no setor da Construção Civil de Salvador (BA), sob o enfoque da gestão e reciclagem dos resíduos gerados. O estudo reúne e analisa os indicadores disponíveis, e aponta os principais atores envolvidos na região. Os resultados identificaram particularidades e dificuldades existentes na região, apontando a necessidade de novas alternativas de destinação para os resíduos gerados. Espera-se que os resultados possam contribuir para o fomento da EC na Construção Civil de Salvador e de outros municípios do país, e conseqüentemente, contribuam para minimizar os impactos negativos dessa indústria e gerar benefícios econômicos e sociais.

**Palavras-chave:** economia; circular; resíduos; construção; demolição; RCD.

## **CIRCULAR ECONOMY IN THE CONSTRUCTION SECTOR: AN ANALYSIS OF MANAGEMENT AND RECYCLING OF CDW IN SALVADOR (Bahia - Brazil)**

### **ABSTRACT**

The construction sector is responsible for major environmental impacts, either by the consumption of materials or by the generation of construction and demolition waste (CDW). The application of the concept of Circular Economy (CE) to this industry is fundamental, since this assumes the rupture of the linear economic model (extract, transform and discard) for the use of a model whose materials are designed to return efficiently to the production line. It thus has high potential to address the environmental challenges of the sector, as well as opening up market opportunities and generate economic growth, as it requires new technologies, processes, services and business models. This article analyses the situation and evolution of the Circular Economy in the construction sector of Salvador (Bahia - Brazil), regarding the generation, management and recycling of waste. The study gathers and analyses indicators available and points out the main actors in the region. The results identified particularities and difficulties in the region, revealing the need for new destination alternatives for the generated waste. It is expected that the results presented here can contribute to the promotion of the CE in the Civil Construction of Salvador and other municipalities of the country, and, consequently, contribute to mitigate the negative impacts of this industry and to generate social economic benefits.

**Key-words:** economy; circular; waste; construction; demolition; CDW.



## 1. INTRODUÇÃO

A Construção Civil é um dos setores econômicos mais importantes e influentes da economia mundial. Esta indústria promove uma contribuição de cerca de um décimo do total do PIB global e se apresenta como um grande gerador de emprego. Por outro lado, a indústria da Construção Civil é o setor industrial que mais consome matéria prima em todas as partes do mundo.

Segundo OECD<sup>(1)</sup>, o setor da construção civil é responsável por mais de um terço do consumo global de recursos naturais. Além disso, é importante considerar a energia utilizada na transformação dessas matérias primas em produtos, seu transporte até o local de uso, e os recursos adicionais necessários para sua manutenção, desmobilização e demolição ao final da vida útil. Assim, o setor se coloca também responsável por grande parte do consumo de energia e água, e geração de CO<sub>2</sub> (Plessis<sup>(2)</sup>). A ONU Meio Ambiente estima que 40% das emissões globais de CO<sub>2</sub> podem ser atribuídas à indústria da construção (UN Environment<sup>(3)</sup>).

No que se refere a geração de resíduos, John<sup>(4)</sup> estima que a produção mundial se encontre entre valores de 163 a más de 3000 kg per capita, com valores típicos entre 400 e 500 kg per capita. O Banco Mundial estima que o setor da construção civil gera cerca de 40% de todos os resíduos sólidos urbanos (World Bank<sup>(5)</sup>). Diversos estudos (Siew<sup>(6)</sup>; Kofoworola & Gheewala<sup>(7)</sup>; Carneiro et al<sup>(8)</sup>; entre outros) indicam que o descarte ilegal de resíduos de construção é outro problema comumente encontrado na indústria da construção civil.

A aplicação do conceito de Economia Circular (EC) à esta indústria é fundamental, visto que este pressupõe a ruptura do modelo econômico linear (extrair, transformar e descartar) para o uso de um modelo cujos materiais são desenvolvidos para retornar de forma eficiente à linha de produção. Possui, assim, alto potencial para resolver os desafios ambientais do setor, além de abrir oportunidades de mercado e crescimento econômico, pois prevê novas tecnologias, processos, serviços e modelos de negócios (Morató et al<sup>(9)</sup>).

Nesse sentido, a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) se destaca como uma atividade que contribui fortemente para o desenvolvimento da circularidade das atividades econômicas desta indústria. A reciclagem de RCD produz benefícios ambientais tais como redução no volume de extração de matéria-prima, consumo de energia, emissões de CO<sub>2</sub>, poluição gerada, disposição inadequada de resíduos potencialmente recicláveis em aterros sanitários e custos municipais pelo tratamento desses resíduos. Além disso, a reciclagem do RCD permite em muitos



casos o fechamento do ciclo produtivo da construção civil, uma vez que o processo de produção de agregados reciclados é semelhante à produção de agregados convencionais e pode fornecer materiais para uso na mesma indústria (Alberte<sup>(10)</sup>).

Iwasaka<sup>(11)</sup> afirma que para implementar uma economia circular deve-se levar em consideração o nível de circularidade atual e a que se almeja atingir. Lieder e Rashid<sup>(12)</sup> trazem dois tipos de abordagens diferentes para implementação em larga escala (sentido top-down e sentido bottom-up). O sentido top-down (de cima para baixo) envolve políticas e legislações específicas, infraestrutura de suporte e consciência social. Por outro lado, o sentido bottom-up (de baixo pra cima) que utiliza modelos colaborativos de negócio, melhorias em design de produtos e cadeias de suplementos, além de tecnologia da informação.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é realizar uma análise acerca da aplicação do conceito de economia circular no setor da indústria da Construção Civil no município de Salvador, usando a abordagem top-down, com foco na gestão e reciclagem de resíduos de construção e demolição. O estudo proposto compreenderá o levantamento e tratamento de dados para identificar boas práticas, dificuldades e oportunidades de melhoria no contexto de gestão do município e do gestor de obra.

Espera-se que os resultados possam fomentar a prática de atividades econômicas circulares do setor da Construção Civil da Região Metropolitana de Salvador (RMS) e demais municípios do país, e produzam contribuições exitosas em caráter prático para amenizar os impactos dessa indústria e consolidar o setor de reciclagem de RCD na região.

## **2. ECONOMIA CIRCULAR E A GESTÃO DE RCD**

O conceito de EC tem sido amplamente difundido nos últimos anos buscando aprimorar a cadeia de produção, consumo, distribuição e recuperação de materiais e energia (Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S.<sup>(13)</sup>). Segundo estes autores, a EC se apresenta como um novo paradigma de desenvolvimento que implica repensar processos econômicos e atividades humanas dentro das restrições ecológicas do planeta. Diversos estudos, entre eles Huang et al.<sup>(14)</sup>; Esa et al.<sup>(15)</sup>; Lu & Yuan<sup>(16)</sup>, indicam que o enfoque da EC e seus princípios básicos de “Reduzir, Reutilizar e Reciclar” podem ser aplicados de forma eficaz no ciclo de vida das construções em especial no que tange a gestão, reciclagem e reuso dos resíduos de construção e demolição. A EC é considerada pelas industriais alinhadas com os desafios atuais da sustentabilidade e responsabilidade socioambiental como uma das prioridades de desenvolvimento estratégico para o século XXI, pois adota a



integração de questões crítica de sustentabilidade e desenvolvimento de negócios (World Economic Forum<sup>(17)</sup>). No entanto, Ritzén & Sandström<sup>(18)</sup>, destacam que a EC ainda é apenas raramente e de forma fragmentada aplicada na prática. Os autores ainda destacam que a literatura até o momento é basicamente conceitual ou teórica e, embora barreiras relevantes sejam apontadas em pesquisas e publicações científicas, elas raramente são baseadas em casos empíricos.

Agregar valor ao RCD é uma questão complexa, que precisa ser enfrentada em várias frentes, em especial no que diz respeito a implantação dos conceitos da EC nas empresas de construção civil (Núñez-Cacho et al<sup>(19)</sup>). Este setor, por um lado extrai um significativo volume de recursos naturais, com destaque para os agregados naturais (areia e pedra), e, por outro lado, gera quantidades expressivas de RCD (Carneiro et al<sup>(8)</sup>). A aplicação do conceito de EC à esta indústria é fundamental, visto que este pressupõe a ruptura do modelo econômico linear (extrair, transformar e descartar) para o uso de um modelo cujos materiais são desenvolvidos para retornarem com eficiência à linha de produção (Siew<sup>(6)</sup>).

Andrews<sup>(20)</sup> destaca que EC implica principalmente em uma mudança de mentalidade que considera os resíduos como recursos potencialmente úteis e não como um problema para gerenciar e descartar em aterros, como na economia linear do passado. O autor frisa que na EC, os materiais, componentes e produtos finais são projetados para reutilização e reciclagem no final de sua vida, apoiando, assim, ciclos de produção e consumo mais sustentáveis. Isso requer a reversão do conceito original de resíduo que caracteriza a economia linear, para o conceito cíclico da EC. Os resíduos na EC passam a ser vistos como parte de um ciclo contínuo de material e energia que não deve ser bloqueado. As estratégias de EC identificam as melhores oportunidades de tratamento final para os residuais e redução da sua geração na fonte, principalmente através do aumento da eficiência na construção, eco design e na adoção de práticas de reciclagem e reuso (Prendeville et al.<sup>(21)</sup>; Esa et al.<sup>(15)</sup>).

A detalhada revisão bibliográfica feita por Ghisellini, Ripa e Ulgiati<sup>(13)</sup> demonstra que, na maioria dos casos, a reutilização / reciclagem de RCD no final de vida de um edifício, bem como a produção de produtos reciclados, proporcionam benefícios ambientais e econômicos. No entanto, a viabilidade da aplicação da EC é muito específica dependendo de vários fatores locais, como tipo de material, os elementos de construção, as distâncias de transporte, o contexto econômico e político.

### **Indicadores como ferramentas de apoio a decisão**

Os indicadores são poderosas ferramentas de apoio a toma de decisões. A adoção de indicadores para avaliar e monitorar o progresso rumo ao desenvolvimento sustentável é fortemente recomendada por cientistas (Bolcárová & Kološta<sup>(22)</sup>; Cornescu & Adam<sup>(23)</sup>), formuladores de



políticas (UNDESA <sup>(24)</sup>), instituições internacionais (OECD<sup>(1)</sup>), governos <sup>(9)</sup> e setor empresarial<sup>(17)</sup>. Segundo Morató et al <sup>(9)</sup>, para poder aplicar de forma prática e eficiente os conceitos da EC, é necessário ter um conjunto de indicadores devidamente contextualizados e enquadrados dentro de um marco de referência adequado. Contudo os autores afirmam que a adoção de indicadores específicos da EC é uma abordagem recente em pleno desenvolvimento e que sua aplicação prática requer certo consenso entre as esferas técnico-científica, os setores envolvidos e os responsáveis pela tomada de decisões.

A qualidade e a confiabilidade dos indicadores dependem do aprimoramento constante dos meios para avaliar os conjuntos de indicadores mais adequados para cada situação específica ou objetivo. A pesquisa identificou quatro bibliografias recentes que propõem conjuntos de indicadores para EC (Morató, Tollin e Jiménez, <sup>(25)</sup>; Geng et al. <sup>(26)</sup>, An, Maarten e Veronique, <sup>(27)</sup>, EEA REPORT<sup>(28)</sup>). O quadro 1 apresenta um resumo destes conjuntos de indicadores adaptado ao setor de construção civil, com suas respectivas descrições, agrupando estes nas fases de projeto/uso e construção/ demolição.

A literatura especializada (Aveline et. al <sup>(29)</sup>; James et al.<sup>(30)</sup>; Cloquell-Ballester et al.<sup>(32)</sup>) apresenta vários métodos que podem ser aplicados para apoiar o processo de escolha de um indicador ou um conjunto deles. Entre eles estão a avaliação especializada, critérios referenciais, seleção participativa, método 3S - auto, validação científica e social, comparação de dados reais, revisão metodológica e teste de utilidade (aplicação e observação). Cada contribui de forma diferente para se buscar a melhor aplicabilidade e qualidade. Niemeijer & de Groot <sup>(32)</sup>, Gudmundsson <sup>(34)</sup> e outros mencionam que a seleção de indicadores não é uma tarefa comum. O processo de seleção deve ser feito de forma transparente e cientificamente válida e deve incorporar sempre que possível as partes interessadas, mas não à custa de se tornar um processo excessivamente desestruturado, pois é necessário um equilíbrio entre as abordagens top-down e bottom-up (Reed et al.<sup>(34)</sup>).

Morató et al <sup>(9)</sup>, concluiu que em um processo de construção de sistemas de indicadores da EC, deve-se ter em mente que uma parte considerável dos indicadores ainda não está totalmente desenvolvida. Os autores destacam que isso é especialmente visto nos indicadores relacionados à prevenção na fonte, eco-desenho e eco-inovação. Por sua vez, nota-se que houve um progresso significativo nos últimos anos nos indicadores de uso eficiente dos materiais e na gestão de resíduos. Este trabalho parte da premissa que são necessários maiores esforços para a seleção de indicadores que forneçam uma visão mais completa e detalhada do progresso da EC, em especial no setor de construção civil.



**Quadro 1: Indicadores identificados na bibliografia**

Fase	Indicador	Definição	Morató, Tollin e Jiménez <sup>(25)</sup>	Geng et al. <sup>(26)</sup>	Na, Maarten e Veronique <sup>(27)</sup>	EEA REPORT <sup>(28)</sup>
Projeto e Uso	Proporção de materiais reciclados em novos produtos	Indicador quantitativo sobre a quantidade de especificações de produtos reciclados	X			
	Nível de circularidade das empresas produtoras	Taxas de perdas durante a produção das matérias primas e durante os processos produtivos			X	
	Projeto promovendo menor uso de recursos naturais durante a vida útil	Indicador qualitativo de utilização de reaproveitamento de águas e materiais, além de fontes alternativas de energia				X
	Projeto pensando em uma possibilidade de reforma	Indicador qualitativo de aumento da vida útil do empreendimento				X
Construção e Demolição	Resíduos sólidos descartados	Total de material que segue para descarte final (ton)		X		
	Produção do principal recurso mineral utilizado na indústria analisada	Produção de brita em toneladas		X		
	Taxa de reciclagem de resíduos urbanos em geral	Indicador quantitativo (Quantidade de resíduos produzidos/Quantidade de resíduos reciclados)			X	
	Taxa de reciclagem de resíduos de construção e demolição	Indicador quantitativo (Quantidade de resíduos produzidos/Quantidade de resíduos reciclados)			X	
	Pegada Ecológica	Indicador quantitativo do impacto da produção de empreendimento			X	
	Consumo de matérias primas secundárias	Consumo de itens como madeira, vidro, plástico e etc.			X	
	Consumo de matérias verdes	Madeira de reflorestamento, plástico reciclado e etc	X			
	Consumo de água	Quantidade total de consumo de água na produção do empreendimento	X			
	Volume de águas utilizadas nos processos de reciclagem de materiais	Indicador quantitativo em litros	X			
	Qualidade do material reciclado	Indicador qualitativo de ensaios dos materiais reciclados	X			
Taxa de recuperação de energia	Mede benefícios potenciais que podem ser obtidos a partir de sua recuperação de energia elétrica, produtiva ou de deslocamento			X		

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho trata-se de um levantamento descritivo, feito com o apoio de publicações científicas e institucionais. A pesquisa do tipo levantamento descritivo, segundo Filippini<sup>(35)</sup>, objetiva descrever um certo comportamento ou fenômeno dentro de uma população, sem o objetivo direto de desenvolver teorias, ainda que através dos fatos descobertos possam ser alcançados tais resultados.

Inicialmente foi realizada revisão bibliográfica sistemática sobre literatura existente no cenário nacional e internacional acerca da gestão de RCD na perspectiva da EC, incluindo metodologias de análise e indicadores aplicáveis. Para tal, foram revisados artigos publicados em periódicos científicos internacionais e nacionais, livros, teses, dissertações, relatórios técnicos, pesquisas setoriais e anais de conferências internacionais e nacionais relacionados ao tema. A partir dos resultados da pesquisa bibliográfica, foram identificados indicadores aplicáveis a análise da circularidade econômica do setor da Construção Civil, sob o enfoque da gestão e reciclagem de RCD Classe A, conforme Resolução CONAMA 307<sup>(36)</sup>. Os resultados desta etapa estão apresentados no Quadro 1 (Item 2).



Em seguida foi realizada uma análise acerca dos dados disponíveis no município de Salvador sobre geração e gestão de resíduos Classe A, e oferta e uso de agregado reciclado. Adotou-se a abordagem top-down com o objetivo de traçar o panorama atual da circularidade dos RCDs na região. Para tal, foram analisados documentos e dados disponibilizados pelos órgãos municipais responsáveis pela gestão de resíduos municipais, bem como sindicatos e associações relacionados ao setor da construção da região (LIMPURB – Empresa de Limpeza Urbana de Salvador, SECIS – Secretaria da Cidade Sustentável e Inovação, SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção do Estado da Bahia).

A partir deste levantamento, foi possível coletar dados sobre leis e políticas públicas existentes; quantidade de resíduo Classe A coletado pelo gestor; fontes de destino e tratamento de RCD existentes; e oferta de material reciclado. Com esses últimos, foram elaborados mapas e gráficos de análise com auxílio do Google Map Maker e Google Charts e Excel. Os resultados permitiram analisar a capacidade de reabsorção dos RCD gerados na região, e avaliar o nível de circularidade atual da economia local, bem como tendências e lacunas para potencializar esta circularidade. Finalmente, se propõe um sistema de indicadores de análise da circularidade do setor da Construção Civil dentro do âmbito municipal, tendo em vista a disponibilidade de dados do município e a bibliografia analisada.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Leis e políticas públicas existentes – análise acerca dos incentivos legislativos**

No âmbito de Salvador foram identificados, em especial, os seguintes incentivos legislativos:

- Resolução Conama 307<sup>(36)</sup>, cuja última atualização se deu em 2015, e que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção, indicando a necessidade do município apresentar um Plano Municipal de Gestão de RCC.
- Lei nº 12.305<sup>(37)</sup>, Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece diretrizes para gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, e determina as responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Destaca-se por indicar que o RCD possui alto potencial de reciclagem e portanto, deve ser reconhecido como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. Para o setor da Construção Civil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos indica que as construtoras são responsáveis pelos seus resíduos e rejeitos e devem realizar um plano



de gerenciamento de seus resíduos sólidos (coleta seletiva, recuperação e reciclagem, tratamento e destinação final). Sinaliza, ainda, que a contratação de terceiros não isenta as construtoras da responsabilidade pelo gerenciamento inadequado dos respectivos resíduos ou rejeitos. Portanto, todas as etapas de gestão dos resíduos (coleta seletiva, recuperação e reciclagem, tratamento e destinação final) deverão ser monitoradas pelo gerador responsável.

- Lei Estadual nº 12.932<sup>(38)</sup>, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e que determina, entre outras coisas, que as empresas de construção civil, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA, estão sujeitas à elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.
- Decreto Municipal nº 12.133<sup>(39)</sup>, que dispõe sobre manejo, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e destino final dos resíduos sólidos resultantes das obras de construção civil e dos empreendimentos com movimento de terra - entulho - e dá outras providências. O decreto em questão, determina que o RCD gerado na zona urbana de Salvador só poderá ser depositado nas áreas previamente indicadas e autorizadas pela Prefeitura, através de seu órgão de limpeza urbana.
- Lei municipal Nº 8.915<sup>(40)</sup> que dispõe sobre a Política Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; institui o cadastro municipal de atividades potencialmente degradadoras e utilizadoras de recursos naturais - CMAPD e a taxa de controle e fiscalização ambiental - TCFA, no Município de Salvador, e dá outras providências. Destaca-se por apresentar entre suas diretrizes o incentivo à reciclagem, ao reuso dos recursos naturais, ao desenvolvimento de pesquisas e à criação ou absorção de tecnologias mais limpas, para constante redução dos níveis de poluição e degradação ambiental.

Evidencia-se, assim, a existência políticas públicas municipais alinhadas com as políticas públicas estaduais e federais voltadas ao incentivo ao adequado gerenciamento de resíduos de construção e demolição. Contudo, como o objetivo de direcionar melhor o desenvolvimento e consolidação de uma EC para o setor, observa-se a carência por políticas mais específicas sobre o uso de agregados reciclados em obras públicas e privadas do município.

#### **4.2. Geração, transporte e destinação de RCD – análise acerca dos agentes envolvidos**

As análises dos dados focaram nos agentes geradores e transportadores de RCD, bem como nos agentes envolvidos com a destinação deste material.



Com relação à geração e destinação de RCD, observa-se que Salvador tem a disposição apenas um Aterro Ambiental de Inertes, que abriga a única usina de reciclagem fixa em operação responsável pela recepção dos RCD da região. Situado na Região Metropolitana na Cidade de Simões Filho, fica a cerca de 30km da região central de Salvador.

A figura 1 apresenta uma análise acerca da quantidade de RCD encaminhados para a referida destinação ao longo dos últimos três anos. Recebendo uma média de cerca de 65.000 ton/mês, observa-se que a maior fornecedora de RCD é a própria empresa de gestão municipal de resíduos sólidos e seus transportadores cadastrados, correspondendo em média a 88% de todo o fornecimento.

A Figura 2, por sua vez, apresenta em detalhe a variação, ao longo do referido tempo, de envio de RCD ao aterro, por parte da iniciativa privada. É possível notar uma leve ascensão dos fornecedores privados, o que sinaliza uma evolução da iniciativa privada em realizar a destinação correta do RCD.

Figura 1: Envio de RCD ao Aterro Ambiental do Município por responsável

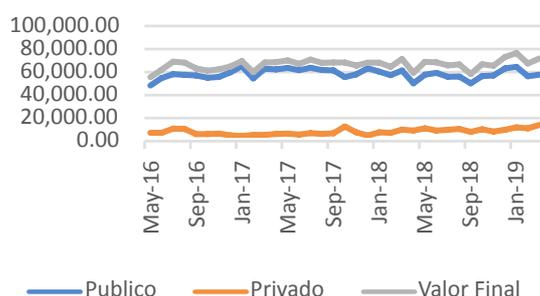
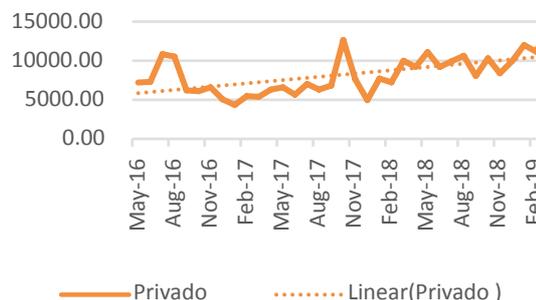
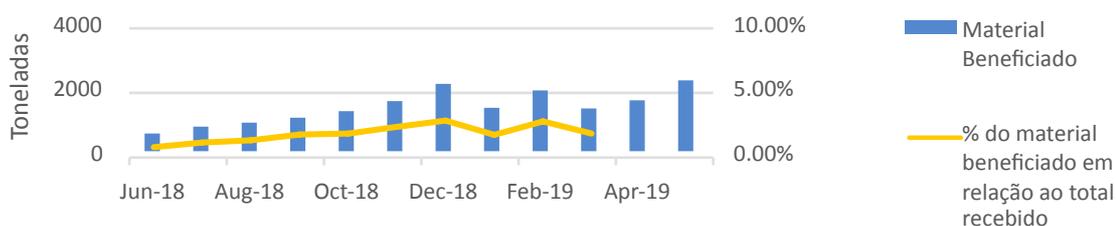


Figura 2: Envio de RCD ao Aterro Ambiental do Município – iniciativa privada



Porém de todo o material recebido pela empresa público-privada que administra o RCD da cidade, a figura 3 mostra que em média apenas 2% do material recebido é beneficiado e pode retornar a cadeia produtiva da construção em forma de doação. A média total de produção gira em torno de 1.300 ton/mês. O que também corresponde a menos 1% da produção de agregados naturais da região. Os dados de material total recebido foram disponibilizados apenas até março de 2019.

Figura 3: Quantidade de material beneficiado e relação percentual com material recebido





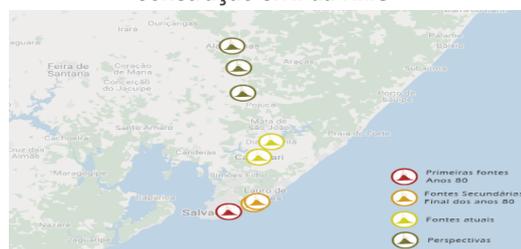
No contexto da seletividade nos processos de demolição foram identificadas 262 empresas com registro atualizado no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia da Bahia (CREA-BA) que possuem como um dos objetivos sociais ações de demolição. Dentro das empresas listadas quase metade delas (123) se localizam dentro da RMS. Foi possível levantar informações sobre 74 dessas empresas, porém apenas 15 delas informaram que realiza ou já realizaram atividades de demolição seletiva. Isto corresponde a 20% das empresas que disponibilizaram informações, demonstrando que há a disposição capacidade técnica para a atividade, mas também um potencial espaço de aprimoramento do setor.

Em contrapartida, a distância da usina para a região central da cidade pode representar um empecilho para o consumo do agregado reciclado. Ainda que as empresas produtoras de agregado natural também se localizem em pontos mais distantes da região central, há um grande número de pedreiras dentro dos limites municipais com um capacidade de mineração capaz de atender as demandas da região por um tempo. Segundo Gonçalves, Moreira e Borges<sup>(41)</sup> o fornecimento de agregados graúdos ocorria antigamente dentro do perímetro urbano, porém com o desenvolvimento da cidade as pedreiras fornecedoras se concentraram nos limites da capital e em cidades próximas como Simões Filho e Lauro de Freitas (Figura 4). Todas as fontes atuais localizam-se em uma faixa de 15km de extensão de um alto estrutural. Das 7 principais pedreiras que abastecem a cidade, cinco apresentam aproximação de comunidades com construções informais fomentadas pelo crescimento desordenado da capital. Considerando uma produção média de 180.000 ton/mês, a perspectiva é que com estas pedreiras com uma taxa de recuperação de 80% tenham vida útil seja até meados de 2050, desconsiderando outras possíveis fontes que podem ser descobertas, mas sejam limitadas pelo desenvolvimento urbano.

Figura 4 – Mapa histórico de fontes de brita para construção civil da RMS



Figura 5 – Mapa histórico de fontes de areia para construção civil da RMS



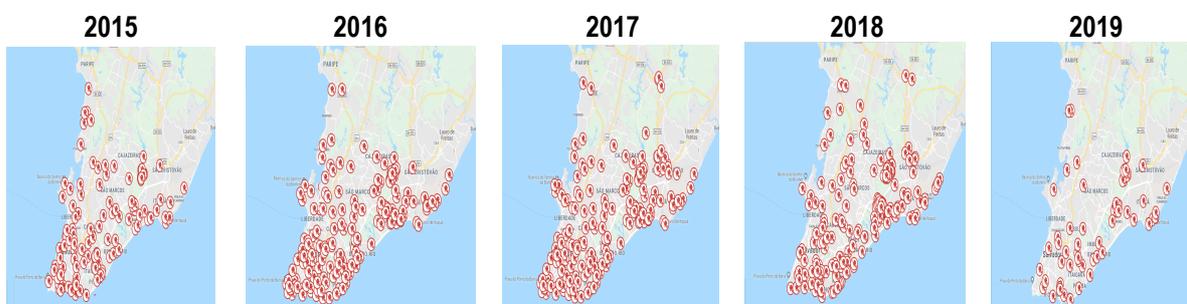
Fonte: Os autores com dados do CPRM

Segundo Gonçalves, Moreira e Borges<sup>(41)</sup> até a década de 80 a areia da construção civil na RMS era extraída de dunas litorâneas e mais tarde de dunas localizadas entre a lagoa do Abaeté e o Aeroporto Luís Eduardo Magalhães, como mostra a Figura 5. Porém, com algumas restrições ambientais implementadas o aproveitamento de areais brancas foi transferido para os municípios de Camaçari e Dias D'Ávila, a cerca de 10km de Salvador e ainda na RMS. Estima-se que exista uma produção per



capita de cerca de 0,4 toneladas por ano. A perspectiva de esgotamento das areias brancas nessas localidades até 2023, como alternativas além da utilização do material reciclado estão o aproveitamento de materiais amarelados ou impuros de regiões adjacentes a fontes atuais ou utilização de material de formação Marizal entre os municípios de Catu e Alagoinhas com distâncias superiores a 80km da capital. Finalmente, considerando o vetor de crescimento da cidade (Figura 6), a partir de gráficos elaborados com dados primários disponibilizados pela SEDUR (Secretária de Desenvolvimento Urbano) referentes a alvarás de novas construções, percebe-se que o município tende a se expandir em direção as pedreiras e a central de reciclagem de agregados. Isto sugere que os canteiros de obra estarão cada vez mais próximos dessas áreas, diminuindo gastos com deslocamentos tanto para a obtenção de agregado natural quanto reciclado. Esta situação em particular, pode proporcionar um ambiente mais ou menos favorável ao uso de agregado produzido a partir da reciclagem de RCD. O diferencial para escolha de qual material utilizar ocorrerá essencialmente pelo custo do agregado e de transporte. Apesar do crescimento em direção aos limites municipais ainda existe muitas novas obras surgindo principalmente na orla atlântica, obras de reforma na regiões centrais e crescimento informal no miolo da cidade que também são potenciais produtores de resíduos em dimensões individualmente menores.

**Figura 6: Mapas da construção formal em Salvador entre 2015 e 2019**

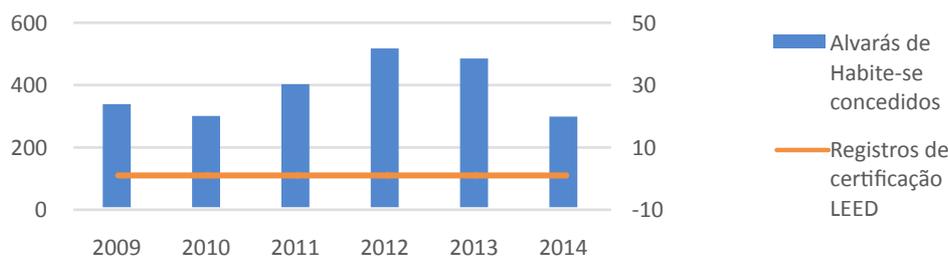


No que se refere a certificações ambientais, há alguns empreendimentos no território com diferentes certificações, incluindo um programa de bonificação municipal (IPTU Verde) para edificações que em uso atendam alguns critérios de sustentabilidade. Dentre essas certificações ambientais destaca-se a certificação LEED que oferece pontuação para as iniciativas que utilizarem agregados reciclados. Segundo base de dados disponibilizada pelo Green Building Council Brasil (GBC Brasil), existem 1.372 edificações registradas no país e apenas 2% se encontram em território baiano. Apesar da primeira certificação nacional ter sido concedida em 2007, o município de Salvador só fez o primeiro registro em 2009. A figura 7 mostra a evolução de empreendimentos com Habite-se em Salvador, segundo SEDUR, e empreendimentos certificados de 2009 até 2014, segundo GBC Brasil. Apesar da flutuação do número de novas edificações que ocorreu durante o boom da construção civil entre os anos de 2012 e 2013, a



quantidade de certificações permaneceu constante e inferior a 1% do total. Apesar dos dados de Habite-se dos anos posteriores não estarem disponíveis, os dados das certificações demonstram que nos anos seguintes a média seguiu constante, apenas atingindo o nível de 0% no ano de 2017, provável reflexo da crise econômica que afetou o setor no período.

**Figura 7 – Empreendimentos disponibilizados e empreendimentos registrados LEED na capital**



Fonte: Os autores a partir de dados da GBC Brasil e SEDUR

### 4.3. Proposta de indicadores

A partir da análise dos dados levantados e da revisão bibliográfica acerca indicadores para EC, foi elaborada uma proposta de indicadores para aplicação no município de Salvador (Quadro 2).

**Quadro 2: Proposta de indicadores para análise da circularidade econômica do Setor da Construção Civil do município de Salvador – foco em gestão de RCD**

Fa-se	Indicador	Definição	Unidade	Disponibilidade	Periodicidade de coleta	Fonte potencial de dados primários
Projeto	Empreendimentos com certificações ambientais	Quantidade de empreendimentos certificados em comparação ao total de empreendimentos ofertados na região	%	Existente	Anual	SEDUR
Uso	Empreendimentos que fazem coleta seletiva	Quantidade de empreendimentos com separação dos resíduos em comparação ao total de empreendimentos ofertados na região	%	A elaborar	Anual	SECIS
Construção	Consumo direto de matérias primas	Comercialização de brita	Ton	Existente	Mensal/Anual	CPRM
		Comercialização de areia	Ton	Existente	Mensal/Anual	CPRM
	Perdas de materiais	Quantidade de material gerado para descarte	Ton	Existente	Mensal / Anual	LIMPURB
		Quantidade de material recebido em aterros	Ton	Existente	Mensal / Anual	LIMPURB
	Uso de materiais reciclados	Comercialização de agregado miúdo reciclado	Ton	A elaborar	Anual	LIMPURB
		Comercialização de agregado graúdo reciclado	Ton	Existente	Mensal/Anual	LIMPURB
Distância de matérias primas	Distância dos pontos de crescimento da cidade para pontos de descarte de resíduos classe A	km	A elaborar	Anual	SECIS	
Demolição	Empresas de demolição seletiva	Quantidade de empresas do município que estão preparadas para realizar demolições seletivas	Unidade	A elaborar	Anual	CREA

Os indicadores propostos permitem através de dados acessíveis o acompanhamento da quantidade de matéria prima requerida pelo setor (consumo de agregados reciclado e naturais), um acompanhamento da evolução de resíduos descartados de forma regular e irregular (Material



recebido, pontos de descarte irregular e notificações de irregularidade), dificuldade de acesso ao agregado natural (distância dos pontos de construção aos pontos de lavra) e preocupação do setor com a sustentabilidade neste quesito (empresas de demolição seletiva e número de empreendimentos certificados). Estes indicadores fornecem um panorama geral para aplicação da economia circular no setor, visto que o agregado reciclado é reinserido no mercado com valor agregado inferior, devido a restrição de utilização em algumas partes estruturais de edificações e a possibilidade de poder ser reinserido novamente na cadeia em caso de uma nova demolição. Estes indicadores também permitem análises dos principais pontos de dificuldade para promoção da circularidade, como por exemplo a baixa taxa de reabsorção do mercado dos resíduos reciclados.

## **5. CONCLUSÕES**

Dentro do contexto do que é gerado na RMS, é possível notar a importância dos órgãos de gestão de resíduos públicos na adequada destinação do material. Em contrapartida há também uma tendência de crescimento da iniciativa privada em encaminhar seus resíduos para reciclagem, buscando, além do descarte adequado, uma reinserção deste material na cadeia produtiva da construção.

Ações de âmbito municipal que poderiam contribuir para o melhor desenvolvimento da circularidade econômica do Setor da Construção Civil na região, com foco em RCD, podem compreender a criação de tecnologias para controlar/fiscalizar a destinação do RCD e a elaboração de especificações técnicas municipais para direcionar o uso de agregados reciclados em obras públicas da região.

Entende-se que existe uma grande relevância na abordagem da EC dentro do contexto da Construção Civil. Por isso, foi possível levantar uma gama de diversos indicadores que possibilitam a análise do nível de circularidade de empreendimentos e de regiões. Dentre eles, destacam-se 10 indicadores propostos que podem ser levantados com maior facilidade e apontam demandas e caminhos para se alcançar uma maior circularidade no setor. Espera-se que os indicadores selecionados possam fomentar iniciativas de sustentabilidade para o caminho da EC dentro deste município e que possa servir como referência para outras avaliações que busquem identificar ações para amenizar os impactos da indústria da construção ao meio ambiente.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à ABRECON pelo apoio a pesquisas relacionadas à gestão e reciclagem de RCD.



## 7. REFERÊNCIAS

1. OECD, **Working party on resource productivity and waste: a policy study on the sustainable use of construction materials**, 2015. Disponível em: <[http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRPW\(2017\)1/FINAL&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRPW(2017)1/FINAL&docLanguage=En)>. Acessado em: 24 de maio de 2019.
2. PLESSIS, C. D. Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries. Disponível em: <[www.buildnet.co.za/akani/2002/nov/01.htm](http://www.buildnet.co.za/akani/2002/nov/01.htm)>. Acessado em 27 de maio de 2019.
3. UN ENVIRONMENT. **Global status report 2018: towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector**. 2018. Disponível em: <<https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20GlobalABC%20Global%20Status%20Report.pdf>>. Acessado em: 24 de maio de 2019
4. JOHN, V.M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (Livre Docência) – USP, São Paulo, 2000.
5. WORLD BANK. **What a waste: a global review of solid waste management**, 2012. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/pt/302341468126264791/pdf/68135-REVISED-What-a-Waste-2012-Final-updated.pdf>>. Acessado em: 24 de maio de 2019.
6. SIEW, R. **Are we ready for circular economy? Towards zero waste in construction**. Sustainable Buildings, 2019. 4.
7. KOFOWOROLA, O.F.; GHEEWALA, S.H.; **Estimation of construction waste generation and management in Thailand**. Waste Mang., 2009. 29. 731-738.
8. CARNEIRO, A.; BRUM, I; CASSA, J. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.
9. MORATÓ, J. et al. **Situación y Evaluación de la Economía Circular en España**. Madrid: Fundación COTEC para la Innovación, 2017.
10. ALBERTE, E. **Evaluación de la Sostenibilidad Ambiental de Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición**. Barcelona, 2012. Tese (Doutorado) - Departament de Projectes d'Enginyeria, Universitat Politècnica de Catalunya.
11. IWASAKA, F. Y. **Políticas públicas e economia circular: levantamento internacional e avaliação da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, 2018
12. LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. Journal of Cleaner Production. V. 115. p. 36-51. Março 2016.
13. GHISELLINI, P.; RIPA, M., ULGIATI, S. **Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review**. Journal of Cleaner Production, 2018. 178, 618–643.
14. HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R.; REN, J.. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. Resour. Conserv. Recycl, 2018. 129, 36-44.
15. ESA, M.R.; HALOG, A.; RIGAMONTI, L. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. Cycles Waste Manag, 2017. 19. 1144-1154.
16. LU, W.; YUAN, H. A framework for understanding waste management studies in construction. Waste Manag, 2011. 31. 1252-1260.
17. WORLD ECONOMIC FORUM. **Towards the Circular Economy : Accelerating the scale-up across global supply chains**. 2014. World Economic Forum Reports, Geneva.
18. RITZÉN, S. SANDSTRÖM, G.O.; **Barriers to the Circular Economy – integration of perspectives and domains**. CIRP, 2017. 64. 7-12.
19. NÚÑEZ-CACHO, P.; GÓRECKI, J.; MOLINA, V.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. **New Measures of Circular Economy Thinking In Construction Companies**. Journal of EU Research in Business, 2018, 1–16.
20. ANDREWS, D. **The circular economy, design thinking and education for sustainability**. Local Econ., 2015. 30 (3). 305-315.



21. PRENDEVILLE, D. S.; SANDERS, C.; SHERRY, J.; COSTA, F. Circular Economy: Is it enough? Ecodesign Centre Wales Report, 2014.
22. BOLCÁROVÁ, P.; KOLOSTA, S. **Towards the Circular Economy : Accelerating the scale-up across global supply chains**. Ecological Indicators, 2015. 48. 699-705.
23. CORNESCU, V.; ADAM, R.; Considerations Regarding the Role of Indicators Used in the Analysis and Assessment of Sustainable Development in the E.U. Procedia Economics and Finance, 2014.
24. UNDESA. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, 2007. 3rd Edition. UN Department of Economic and Social Affairs , New York.
25. MORATÓ, J.; TOLLIN, N.; JIMÉNEZ, L.; **Situación y evolución de la economía circular en España**. COTEC, 2017.
26. GENG, Y.; FU, J.; SARKIS, J.; XUE, B. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. Journal of Cleaner Production, 2012. 23. 216-224.
27. AN, V.; MAARTEN, C.; VERONIQUE, V.H. **Indicators for a Circular Economy**. DEPARTMENT OF ECONOMY SCIENCE & INNOVATION, 2018.
28. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Circular by design - Products in the circular economy**. EEA Report, 2017. nº6.
29. AVELINE, A.; ROUSSEAU, M. L.; GUICHARD, L.; LAURENT, M.; BOCKSTALLER, C. **Evaluating an environmental indicator: Case study of MERLIN, a method for assessing the risk of nitrate leaching**. Agricultural Systems, 2009. 100(1-3), 22-30.
30. JAMES, C.A.; KERSHNER, J.; O'NEILL, S.; LEVIN, P.S. **A methodology for evaluating and ranking water quantity indicators in support of ecosystem-based management**. Environmental Management, 2012. 49(3). 703-19.
31. CLOQUELL-BALLESTER, V.A.; MONTERDE-DÍAS, R.; SANTAMARINA-SIURANA, M.C. Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. Environmental Impact Assessment Review, 2006. 26, 79-105.
32. NIEMEIJER, D.; DE GROOT, R.S. **A conceptual framework for selecting environmental indicator sets**. Ecological Indicators, 2008. 8(1), 14-25.
33. GUDMUNDSSON, H. Criteria and methods for indicator assessment and validation - a review of general and sustainable transport related indicator criteria and how to apply them. 2010. Disponível em: < [http://cost356.inrets.fr/pub/reference/reports/C356\\_2.2\\_report\\_criteria\\_HG\\_220410.pdf](http://cost356.inrets.fr/pub/reference/reports/C356_2.2_report_criteria_HG_220410.pdf)>. Acessado em: 24 de maio de 2019.
34. REED, M.; FRASER, E.D.; MORSE, S.; DOUGILL, A.J. **Integrating methods for developing sustainability indicators to facilitate learning and action**. Ecology and society, 2005. 10(1).
35. FILIPPINI, R. **Operations management research: some reflections on Evolution, models and empirical studies in OM**. International Journal of Operations & Production Management, v.17, n. 7, p. 655-670, 1997.
36. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº136, 17 de julho de 2002. Seção I, p.95-96.
37. BRASIL. **Lei nº12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 3 de agosto de 2010.
38. BAHIA. **Lei Estadual nº 12.932/14**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências.
39. SALVADOR. **Decreto Municipal nº 12.133/98** - dispõe sobre manejo, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e destino final dos resíduos sólidos resultantes das obras de construção civil e dos empreendimentos com movimento de terra - entulho - e dá outras providências, 1998.
40. SALVADOR. **Lei municipal nº8.915 de 2015**. Dispõe sobre a Política Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.
41. GONÇALVES, J. C. V.; MOREIRA, M. D.; BORGES, V. P. Materiais de Construção Civil na Região Metropolitana de Salvador. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Série Rochas e Mneiras Industriais, nº2, 2008.



## ESTABILIZAÇÃO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA COM CAL E REJEITO DE MINERAÇÃO

NAVARRO, A. C.<sup>(1)</sup>; MARESTI, J. <sup>(2)</sup>; ARRUDA, E. A. M. <sup>(3)</sup>; HERMENEGILDO, G. C. <sup>(4)</sup>  
BESSA, S. A. L. <sup>(5)</sup>

(1) Universidade Federal de Minas Gerais/ UFMG – annacmnavarro@gmail.com; (2) UFMG – juseffrin1@gmail.com; (3) UFMG – eduardoarchetti@gmail.com; (4) UFMG – gabhircarmo@gmail.com; (5) UFMG – sofiabessa@ufmg.br

### RESUMO

O Brasil é um dos maiores exportadores de minério do mundo, é preciso que repensar as formas de se utilizar os rejeitos gerados por essa atividade de forma que os impactos ambientais sejam minimizados. Nessa linha, este estudo propôs analisar a estabilização de blocos de terra comprimida (BTC) com cal e com rejeito de minério de ferro (RMF). O RMF foi caracterizado por meio de ensaios de granulometria, difratometria de raios x e análise química por fluorescência de raios x. O solo foi analisado, também, por meio de ensaio de limite de liquidez e de plasticidade. Para o estudo, foram produzidos BTCs estabilizados com 10% de cal e com substituição de 0%, 10%, 20% e 30% de solo por RMF. Após o período de cura de 28 dias, os BTCs foram submetidos a ensaios de resistência à compressão e de absorção. Após os ensaios, foi possível concluir que o uso de RMF nos BTCs contribuiu para a diminuição dos valores de absorção de água e no aumento da resistência à compressão, em comparação com os BTCs sem RMF.

**Palavras-chave:** estabilização, blocos de terra comprimida, cal.

## STABILIZATION OF COMPRESSED EARTH BLOCKS WITH LIME AND ORE TAILINGS

### ABSTRACT

Brazil is one of the largest exporters of ore in the world, it is necessary to rethink the ways of using the tailings generated by this activity so that the environmental impacts are minimized. In this line, this study proposed to analyze the stabilization of compressed earth blocks (CEB) with lime and with iron ore tailings (IOT). The IOT was characterized by granulometry, x-ray diffractometry and x-ray fluorescence chemical analysis. The soil was also analyzed by means of a liquid limit determination and plasticity limit. For the study, stabilized blocks were produced with 10% lime and replaced with 0%, 10%, 20% and 30% of soil by IOT. After the 28-day curing period, the CEBs were subjected to compressive strength and absorption tests. After the tests, it was possible to conclude that the use of IOT in the CEBs contributed to the reduction of the water absorption values and the increase in the compressive strength, in comparison with the CEBs without IOT.

**Key-words:** stabilization, compressed earth blocks, lime.



## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é um setor importante da economia brasileira e são vários os materiais extraídos, sendo o minério de ferro o produto mais explorado. A maior parte da exploração e da exportação brasileira são derivadas da mineração. De acordo com dados do relatório anual do IBRAM <sup>(1)</sup>, no ano de 2017 o Brasil exportou um total de 403 bilhões de toneladas de minérios, que representou o equivalente a 13% do total de exportação brasileira e 30,5% do saldo comercial.

O processo de mineração consiste no “conjunto de atividades que, através do beneficiamento dos minérios tem como objetivo modificar as propriedades dos minerais de modo que sua identidade química seja preservada” <sup>(2)</sup>, conforme Figura 01. Para cada 1 tonelada de minério disponível, estima-se que 1,5 toneladas de resíduo arenoso, em média, são gerados no processo de extração <sup>(2,3)</sup>. Esses resíduos acabam sendo utilizados de diversas maneiras, seja na construção civil (em substituição à areia), na base para pavimentação ou então na soterração dos vales que a mineração acaba gerando.

Figura 1 - Esquema típico do processo de mineração de ferro.



Apesar de ser uma atividade extremamente importante para o país, muito se discute sobre os impactos ambientais advindos da prática mineradora. O próprio Código de Mineração do ano de 1967 (Decreto-Lei nº 227, fevereiro de 1967) dava aval para que a atividade gerasse grandes impactos, uma vez que se restringia a dizer que "a atividade de mineração deve evitar a poluição das águas e do ar". A falta de rigidez, quanto aos impactos gerados pela mineração, acabou ocasionando grandes desastres, como foi o caso da barragem de Mariana (MG) no ano de 2015, e de Brumadinho, em 2019, principalmente em detrimento da má gestão dos resíduos que são gerados.



Atualmente, no Brasil, existem 839 barragens de rejeitos registradas, sendo a maioria (66%) de pequeno porte (com volume total de reservatório inferior a 0,5 hm<sup>3</sup>) e concentrada no estado de Minas Gerais (43,5%). No que tange aos critérios de riscos existentes, a maioria (aproximadamente 77%) se encontra em categoria de risco baixo. Quanto ao dano potencial associado (DPA), 56,5% encontram-se baixo, porém 26,58% estão com DPA elevado <sup>(4,5)</sup>.

A construção com terra está associada às baixas emissões de dióxido de carbono e à baixa energia incorporada na produção além da garantia da qualidade interior do ar da edificação, graças à sua capacidade de controle da umidade relativa. Além disso, os custos financeiros são baixos, assim como impactos de poluição derivados da proximidade entre local de obra e local de extração da matéria prima. Outro ponto positivo é sua baixa produção de resíduos afiliada à possibilidade de devolução da terra ao local de retirada <sup>(6)</sup>.

Para tentar diminuir o impacto ocasionado pela atividade mineradora, este estudo propõe a estabilização de tijolos de bloco de terra comprimida (BTC) com rejeito de mineração. Dessa forma, o rejeito, descartado muitas vezes de forma errada, passa a ter um novo uso, diminuindo assim o impacto ambiental <sup>(7)</sup>.

Sob perspectiva mundial, observa-se que, ao longo dos últimos cinquenta anos, uma das tecnologias com uso de terra que mais tem sido aprimorada é a dos blocos de terra comprimida (BTC) e que vem sendo cada vez mais utilizada em países como a Austrália e Estados Unidos <sup>(8)</sup>. As pesquisas sobre a incorporação de resíduos ao BTC têm evoluído na última década, sejam estes estabilizados com o cimento <sup>(9, 10)</sup> ou com a cal <sup>(11-13)</sup>.

Considerando-se a necessidade de propor opções de uso do RMF como insumo na produção de componentes e aproveitando a potencialidade físicoquímica desse material rico em sílica, pretende-se, neste trabalho, estudar a viabilidade técnica do aproveitamento do RMF para uso em blocos solo-cal com a finalidade de obter um componente alternativo ao tradicional bloco de solo-cimento, de boas características físico-mecânicas, que possa ser utilizado para uso em construções.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo: i) A caracterização dos materiais; e ii) As análises do comportamento mecânico e do índice de absorção dos BTCs.



Na primeira fase do estudo, o solo foi extraído manualmente a partir de 50 cm de profundidade, para descartar a presença de material orgânico. O rejeito de minério de ferro (RMF) foi cedido pela Mineradora Samarco e armazenado em tonéis.

A cal utilizada foi do tipo CH-I e o ensaio de finura (para controle) foi realizado de acordo com a NBR 7175 <sup>(14)</sup>. A composição química do solo foi determinada pelo espectrômetro de fluorescência de raios X, marca *Shimadzu*, por pastilhas prensadas. A mineralogia da amostra foi determinada por meio da técnica de difração de raios x, realizada com equipamento SHIMADZU, modelo XRD-7000.

Identificou-se o intervalo plástico do solo por meio da determinação dos limites de liquidez, por meio da NBR 7180 <sup>(15)</sup>, e de plasticidade por meio da NBR 6459 <sup>(16)</sup> do material. A caracterização granulométrica foi realizada segundo as indicações da NBR NM 248 <sup>(17)</sup> e realizada para os dois materiais (solo e RMF), a fim de prever a compatibilidade entre eles.

Para o estudo, foram produzidos BTCs estabilizados com 10% de cal em adição e com substituição de 0%, 10%, 20% e 30% de solo por RMF. A cal foi mantida com valores fixos correspondente a 10% em adição à mistura, conforme a Tabela 01.

**Tabela 1 - Proporção dos materiais usados nos BTCs**

<b>Materiais</b>	<b>BTC-0</b>	<b>BTC-10</b>	<b>BTC-20</b>	<b>BTC-30</b>
Solo	100%	90%	80%	70%
RMF	0%	10%	20%	30%
Cal	10%	10%	10%	10%

Os materiais foram pesados em balança com resolução de 10g e, a fim de se obter uma mistura homogênea, foram misturados em uma argamassadeira industrial com capacidade para 60 kg. A água adicionada correspondeu a aproximadamente 10% do total da mistura, tendo sido definida a quantidade a partir de pequenas adições do líquido juntamente com análise da textura e compactação.

A mistura, após ser homogeneizada, foi colocada na prensa hidráulica PH4C 40x40 T da Hidral-Mac para que os BTCs fossem produzidos, seguindo as recomendações da NBR 10833 <sup>(18)</sup> quanto à qualidade dos materiais empregados, apesar de que não se tratarem de blocos de solo-cimento. Foram feitos onze blocos para cada traço, sendo oito para o ensaio de resistência à compressão e três blocos para o ensaio de absorção, seguindo as recomendações da NBR 10836 <sup>(19)</sup>, conforme pode-se observar na Figura 02. Os BTCs permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de ensaio, aos 28 dias.



Para o ensaio de absorção, após os 28 dias, os BTCs ficaram imersos por 72 h após serem retirados da estufa, esfriados por 30 min e terem sido aferidas as suas massas secas (massa inicial).

Figura 2 - Ensaio de resistência à compressão (esq.) e de absorção (dir.) dos BTCs



Para o ensaio de resistência à compressão, os blocos foram sobrepostos, no formato inteiro, e unidos com pasta de cimento 24 h antes do ensaio, ao invés de serem serrados ao meio para tal fim. Dessa forma, pretendeu-se evitar a perda de massa e a desagregação dos blocos com o corte, além de agilizar o ensaio.

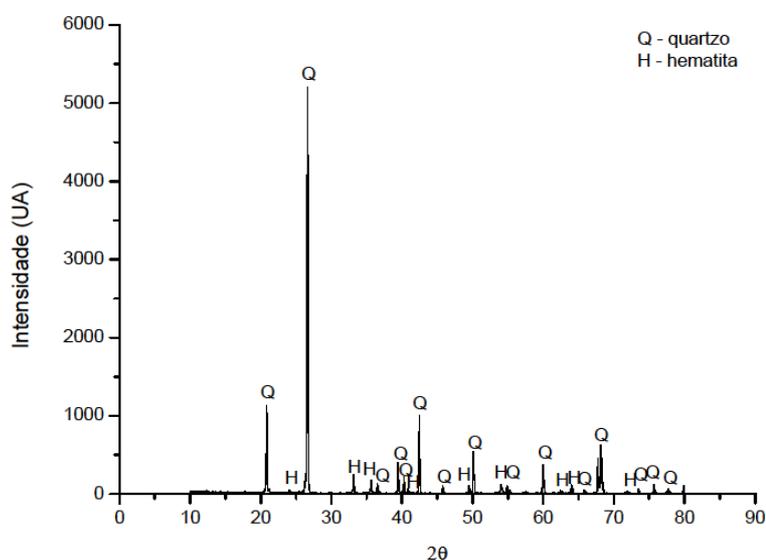
### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelo ensaio de granulometria, o RMF apresentou módulo de finura no valor de 0,13 e dimensão máxima característica no valor de 0,30. Esses valores permitiram que o RMF pudesse atuar como agregado e como filer, principalmente pela sua acentuada característica cristalina, com picos de quartzo (Q) e hematita (H), como se observa no difratograma (Figura 3).

Pela análise química, o RMF apresentou: 48,92% de  $\text{SiO}_2$ , 48,70% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 2,18% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,13% de  $\text{SO}_3$  e 0,09% de  $\text{MnO}$ . Esses resultados atestam que o rejeito de mineração ainda pode conter elevados teores de ferro, mesmo após o processamento, resultado de uma extração pouco efetiva. Da mesma forma, foi observado um teor elevado de sílica, assim como outros autores <sup>(20, 21)</sup>. A finura da cal ficou no valor de 6,67%, compatível com a norma correlata (< 10%), ou seja, adequada para o ensaio.



Figura 3 - RMF – Difratoograma



Pelo ensaio de caracterização do solo, pode-se obter os valores apresentados na Tabela 2. Os ensaios de caracterização do solo dizem respeito à transição de estados físicos de acordo com o percentual de umidade. Dessa forma, o solo estudado torna-se plástico a partir do acréscimo de 20,38% de água, em relação à massa seca total, e líquido a partir de 46,00%.

Tabela 2 - Resultado do ensaio de caracterização do solo.

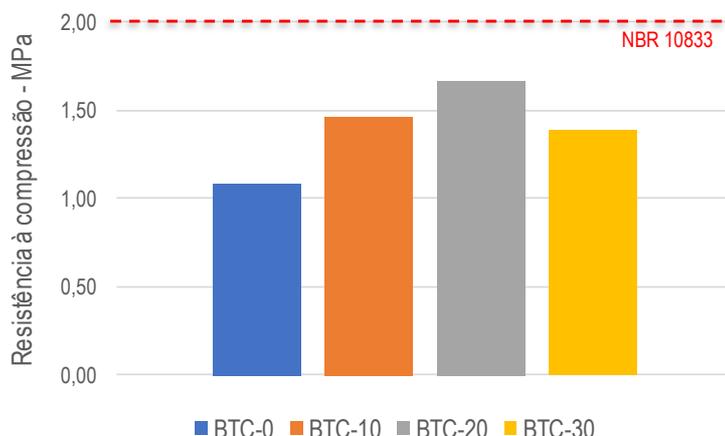
Parâmetros	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Solo	46,00%	20,38%	25,62%
NBR 10833	≤ 45%	-	≤ 18%

Embora o Índice de Plasticidade obtido esteja 7% acima do indicado pela NBR 10833 <sup>(18)</sup> para a fabricação de blocos, o material foi corrigido posteriormente com RMF, sem prejuízo para o processo de moldagem dos BTCs com a composição solo-RMF proposto, inclusive melhorando algumas propriedades.

Em relação aos resultados do ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, pode-se observar que os valores encontrados não alcançam o valor de 2,00 MPa, mas que aumentaram à medida que o solo foi substituído por RMF (Figura 4). Os valores médios do grupo BTC-20 ficaram 53% acima do BTC-0, o que demonstra a efetividade do uso do RMF como estabilizante físico.



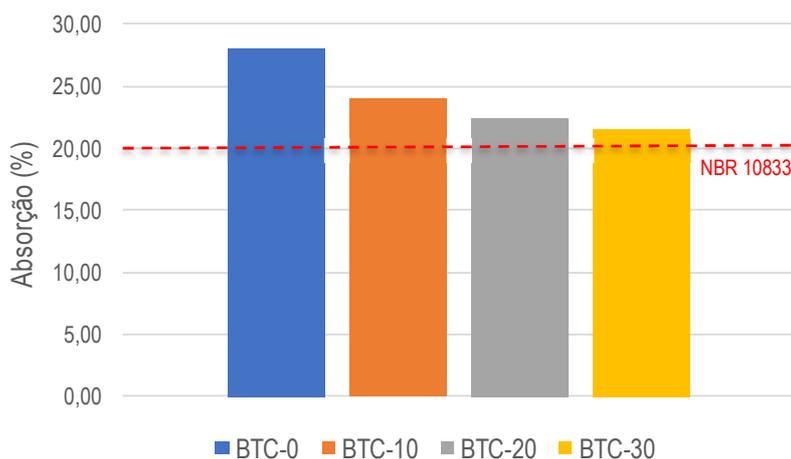
Figura 4 – BTCs com cal – ensaio de resistência à compressão



Figueiredo et al. <sup>(11)</sup> encontraram valores médios de 1,77 MPa, em blocos de solo-cal, e 1,27 MPa, nas misturas com 75% de resíduo de demolição em substituição ao solo, sendo os melhores resultados com 25% de substituição, no valor de 2,35 MPa, aos 28 dias.

Em relação ao ensaio de absorção, observa-se que a mistura com 30% de substituição de solo por RMF (BTC-30) obteve o melhor empacotamento e os valores se aproximaram dos 20% de absorção de água, valor requerido para os blocos de solo-cimento (Figura 5). Somente a estabilização do solo com a cal não se mostrou eficiente e os valores da mistura BTC-0 ficaram 40% acima dos valores recomendados pela NBR 10833.

Figura 5 – BTCs com cal – ensaio de absorção



Patricio et al. <sup>(12)</sup> também obtiveram melhores valores de absorção em blocos de solo-cal com teores de substituição de 20-25% de solo por resíduo de construção e demolição, aos 28 dias. Os autores acrescentaram que os valores de absorção tendem a diminuir com o aumento do tempo de cura, chegando ao melhor valor aos 90 dias.



## 4 - CONCLUSÕES

Após as análises, pode-se avaliar que o alto teor de sílica em estado cristalino e a elevada finura do RMF utilizado atuou na sua atuação como estabilizante físico dos BTCs, colaborando no preenchimento dos vazios deixados pelas partículas do solo, pela diminuição dos valores de absorção de água e pelo aumento da resistência à compressão, em comparação com os BTCs sem RMF.

Foi possível concluir que é possível utilizar a cal e o RMF como componentes de blocos para vedação, desde que haja a adequada impermeabilização dos sistemas construtivos de interface, como as fundações e a cobertura.

## REFERÊNCIAS

1. IBRAM **Informações Sobre a Economia Mineral Brasileira**. Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília, 2018.
2. SILVA, R. G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. 2010. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
3. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas** / Coord. Geral W. F. Pinheiro, O. B. Ferreira Filho, C. A. R. Neves; Equipe Técnica por Marina Marques Dalla Costa... [et. Al.]; – Brasília: DNPM, 2016. 31 p.
4. ANA. **Relatório de segurança de barragens**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 229p. Recuperado de <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragens/rsb-2016/relatorio-de-seguranca-de-barragens-2016.pdf>.
5. SOUZA JUNIOR, T. F., MOREIRA, E. B., HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. **HOLOS**, ano 34, vol. 05. DOI: 10.15628/holos.2018.7423.
6. PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**. Volume 29, April 2012, Pages 512-519.
7. FERREIRA, W. L. **Adição de resíduos do setor mineiro-metalúrgico na fabricação de tijolos solo-cal**. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2013.
8. MOREL, J., PKLA, A., WALKER, P. Compressive strength testing of compressed earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 21, 2007. p. 303–309.
9. JIMÉNEZ, Y. G. A.; IZAGUIRRE, V. M. G. Efectos de utilización de savias vegetales em bloques de tierra comprimida a la prueba de abrasión. **LEGADO de Arquitectura y Diseño**, 19, 2016. p. 101-110.



10. FRANÇA, B; AZEVEDO, A; MONTEIRO, S; GARCIA FILHO, F; MARVILA, M; ALEXANDRE, J; ZANELATO, E. Durability of soil-cement blocks with the incorporation of limestone residues from the processing of marble. *Materials Research*, v. 21. 2018.
11. FIGUEIREDO, S. S.; SILVA, C. G.; NEVES, G. A. Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. *R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 64(3), 273-279, jul. set. 2011.
12. PATRICIO, S. M. R.; FIGUEIREDO, S. S.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil. *Cerâmica*, n. 59, 2013, p. 27-33.
13. GUTIERREZ, R. S. R., IZAGUIRRE, V. M. G., MUJICA, J. A. E. Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental. *Nova Scientia*, Universidad de la Salle Bajío, 2014.
14. ABNT. **NBR 7175**: Cal hidratada - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
15. ABNT. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
16. ABNT. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
17. ABNT. **NBR NM248**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
18. ABNT. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
19. ABNT. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
20. SHETTIMA, A. U., HUSSIN, M. W., AHMAD, Y., MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 120, p. 72–79, 2016.
21. FONTES, W. C.; MENDES, J. C. SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 988–995, 2016.



## AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E DEFLECTOMETRIA DE PAVIMENTO COM CIMENTO DE RCC

**Valdir Moraes Pereira** <sup>(1)</sup>; **Raphael Baldusco** <sup>(1)</sup>; **Valdecir Angelo Quarcioni** <sup>(1)</sup>; **Rubens Vieira** <sup>(1)</sup>; **Elaine Soares** <sup>(1)</sup>; **Patricia Barboza da Silva** <sup>(2)</sup>; **Sérgio Cirelli Angulo** <sup>(3)</sup>

(1) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) – vpereira@ipt.br; (2) Universidade Presbiteriana Mackenzie – patricia.silva1@mackenzie.br; (3) Universidade de São Paulo – sergio.angulo@usp.br

### RESUMO

A maioria dos estudos de reciclagem de materiais na construção civil visa reaproveitar os agregados de resíduos da construção civil (RCC) como areia e brita, no entanto, poucos estudos e aplicações da fração fina são consolidadas no meio técnico/científico. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a execução de uma obra piloto (trecho experimental/piloto) de pavimentação na cidade de Guarulhos - SP em que se empregaram agregados reciclados e naturais com cimento produzido a partir de finos de RCC. Para controle de compactação das camadas do pavimento e acompanhamento pós-execução, foi realizado o ensaio de deflexão por meio da viga Belkelman em todos os trechos executados. Paralelamente também são apresentados os resultados de módulo de resiliência dos materiais utilizados para execução dos trechos. Os resultados mostraram que o módulo de resiliência do subleito e da base do pavimento foram, em média, 68% dos valores de deflexão admissível. Os resultados de deflexão do pavimento indicaram que os trechos executados com agregado reciclado e natural com cimento de RCC apresentaram desempenho superior a BGS e desempenho inferior a BGTC. Verificou-se uma tendência da deflexão dos trechos executados com cimento de RCC se aproximarem dos resultados do trecho executado com BGTC. Este comportamento pode ser explicado pela ação da reação pozolânica no cimento de RCC.

**Palavras-chave:** RCC, cimento de RCC, projeto piloto, deflexão.

## MECHANICAL EVALUATION OF PAVEMENT MADE WITH CDW CEMENT

### ABSTRACT

Most of materials recycling studies in the construction industry aim to reuse the aggregates from civil construction waste (sand and gravel); however, few studies and applications of the fine fraction are consolidated in the technical / scientific environment. In this way, the present work aims to present the execution of a pilot project (experimental section) of paving in the city of Guarulhos - SP in which recycled and natural aggregates were used with cement produced from CCW fines. In order to control the compaction of the pavement layers and post-execution monitoring, the deflection test was carried out by means of the Belkelman beam in all stretches. In parallel, the results of the resilience modulus of the materials used to execute the stretches are also presented. The results of pavement deflection indicated that the runs performed with recycled and natural aggregate with CCW cement presented performance superior to BGS and performance lower than BGTC, as predicted. The results also showed that there is a tendency of the runs performed with CCW cement to approach the results of the run with BGTC. This behavior can be explained by the action of the pozzolanic reaction on CCW cement.

**Key-words:** RCC, RCC cement, experimental project; deflection.



## 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos sobre o aproveitamento de agregados reciclados têm sido realizados <sup>(1)</sup>, principalmente no que diz respeito ao uso em camadas de estabilização de pavimentos, para enchimento de aterros e valas <sup>(2)</sup> e/ou como agregados para uso em concretos <sup>(3)</sup>, <sup>(4)</sup>.

A fração fina de agregados reciclados tem poucas aplicações consolidadas no meio técnico/científico. Estudos têm verificado o potencial parcial de recuperação da capacidade ligante desta fração, desde que seja realizado um tratamento térmico no material em temperaturas inferiores a 600 °C <sup>(5)</sup>, <sup>(6)</sup>. Assim, o uso dos agregados reciclados de RCC com finos “reativos” pode tornar uma alternativa viável para atender às características técnicas e mecânicas de camadas estruturais de pavimento, possuindo propriedades adequadas para atendimento do volume e tipo de tráfego esperado em vias urbanas.

Um dos grandes potenciais de uso do cimento e agregados de resíduos da construção civil (RCC) consiste em compor os materiais de base de pavimentos semirrígidos para vias de moderado-elevado tráfego de veículos, pois este tipo de aplicação demanda resistência mecânica de, aproximadamente, 3,5 MPa e módulo de resiliência superior à 3.000 kgf/cm<sup>2</sup>.

Dados da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) <sup>(7)</sup> indicam que a cidade possui uma malha viária de, aproximadamente, 17.000 km, sendo que 16.000 km dessas vias são pavimentadas. Salienta-se que, além dos 1.000 km de vias não pavimentadas, existem também as vias que, embora não quantificadas pelas estatísticas da PMSP, apresentam elevado grau de deterioração, sendo necessária a sua reconstrução e/ou recuperação parcial.

Diante do exposto, o IPT tem realizado trabalhos de desenvolvimento de cimento de baixa resistência mecânica a partir de RCC (cimento de RCC) e uso combinado com a fração agregado (“não reativa”) de RCC. Neste sentido, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar a execução de um trecho experimental de pavimento usando estes materiais. O trecho experimental foi executado no município de Guarulhos-SP em parceria com a empresa Proguaru. No artigo são apresentados resultados de deflexão no revestimento do trecho piloto em até 8 meses após a sua execução. Paralelamente, também são apresentados os resultados de módulo de resiliência dos materiais utilizados na execução da base da estrutura do pavimento.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As nomenclaturas dos materiais utilizados na execução do trecho experimental são apresentadas a seguir:

- **BGR<sub>TCRCC</sub>**: Brita graduada reciclada tratada com cimento de RCC (Agregado reciclado + cimento de RCC) – Denominado sub-trecho 1;
- **BGN<sub>TCRCC</sub>**: Brita graduada natural tratada com cimento de RCC (Agregado natural + cimento de RCC) – Denominado sub-trecho 2;
- **BGTC**: Brita graduada tratada com cimento Portland convencional (Trecho de referência) – Denominado sub-trecho 3;
- **BGS**: Brita graduada simples convencional (trecho de referência) – Denominado sub-trecho 4.

### 2.1. Materiais

#### 2.1.1 Cimento de RCC

O processamento do cimento de RCC foi realizado por meio de peneiramento, moagem e tratamento térmico. O cimento de RCC foi produzido a partir do processamento dos finos extraídos da areia reciclada (<4,8 mm), coletada na usina de reciclagem – UVR-Grajaú – SP. Em seguida, o cimento de RCC foi composto por frações tratadas e não tratadas termicamente. O tratamento térmico do cimento de RCC foi realizado em temperatura entre 500 e 600°C <sup>(5), (8), (6), (9)</sup>.

Na Tabela 1 é apresentada a análise química do cimento de RCC e na Tabela 2 a sua massa específica, área superficial e tempos de início e fim de pega. É importante ressaltar a elevada área superficial (finura) do cimento de RCC, que justifica-se pela sua elevada porosidade <sup>(10)</sup>.

Tabela 1 - Análise química do cimento de RCC (FRX).

Composto	(%)	Composto	(%)
SiO <sub>2</sub>	45,1	TiO <sub>2</sub>	1,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,3	SO <sub>3</sub>	0,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,22	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,31
CaO	8,94	SrO	0,04
MgO	1,35	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12
K <sub>2</sub> O	2,18	PF	15,1



Tabela 2 - Índices físicos do cimento de RCC.

Propriedade		Resultados
Massa específica (picnometria de gás hélio) (g/cm <sup>3</sup> )		2,67
Finura (Blaine) (NBR NM 16372) (cm <sup>2</sup> /g)		9390
Tempos de pega (NBR 16607) (h:min)	Início de pega	00:48
	Fim de pega	3:54

### 2.1.2 BGR<sub>TCRCC</sub>, BGN<sub>TCRCC</sub>, BGTC e BGS

A brita graduada reciclada tratada com cimento de RCC (BGR<sub>TCRCC</sub>) e brita graduada natural tratada com cimento de RCC (BGN<sub>TCRCC</sub>) foram produzidas com a utilização de cimento obtido a partir de finos de resíduos de construção e demolição (RCC), denominado Cimento de RCC e britas graduadas naturais e recicladas, também conforme <sup>(11)</sup> – faixa B (Figura 1).

Nas misturas com cimento de RCC (BGR<sub>TCRCC</sub> e BGN<sub>TCRCC</sub>) foram utilizados 12% de ligante e na BGTC, 4% de cimento Portland comum.

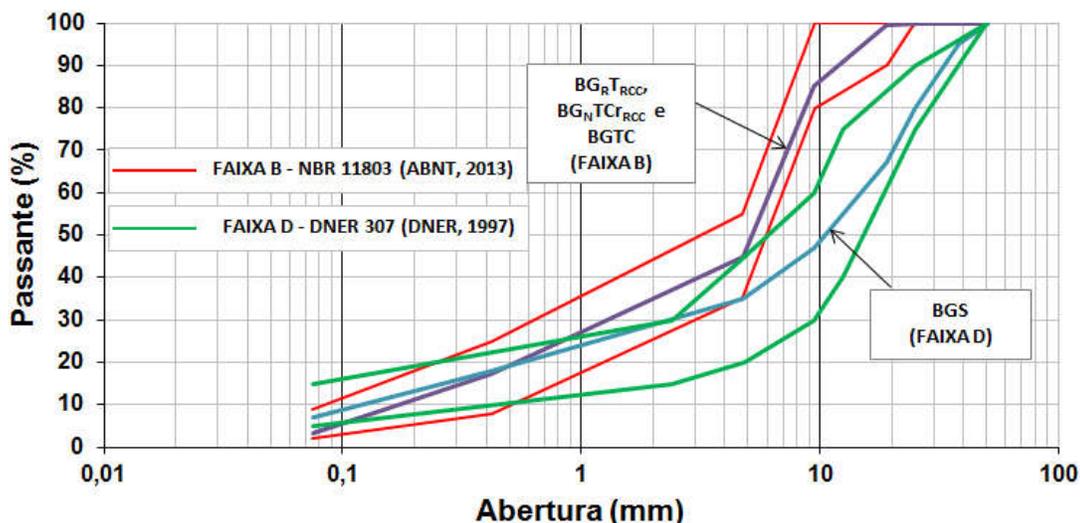


Figura 1 - Granulometria e faixas granulométricas dos agregados utilizados no trecho experimental: BGR<sub>TCRCC</sub>; BGN<sub>TCRCC</sub>; BGTC e BGS.

No trecho executado com BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento) (mistura de referência) foi utilizado cimento CPV ARI 40, sendo seu uso justificado devido à necessidade de ganho de resistência nas primeiras idades para liberação do tráfego. Além do cimento, a BGTC foi preparada com agregados naturais graduados conforme a <sup>(11)</sup> – faixa B (Figura 1). Para a brita graduada simples - BGS (mistura



de referência) foram utilizados agregados naturais graduados (Figura 1) conforme a ET-DE-P00/008<sup>(12)</sup> (Faixa D).

## 2.2. Dimensionamento do pavimento

O dimensionamento estrutural do pavimento foi realizado de acordo com o método IP-04 – Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio da Prefeitura Municipal de São Paulo<sup>(13)</sup>.

O dimensionamento das camadas do pavimento foi realizado adotando-se o valor de “N” característico de  $5 \times 10^5$  (tráfego médio). O número “N” corresponde à quantidade de ciclos (repetições) dos eixos dos veículos equivalentes ao eixo padrão rodoviário (8,2 ton), o qual é o período estimado de vida útil do pavimento.

Posteriormente, foi calculado o coeficiente estrutural da camada de sub-base e determinadas as espessuras das camadas subjacentes (base e sub-base). Ressalta-se que as camadas de base com cimento de RCC foram dimensionadas considerando um coeficiente de equivalência estrutural de valor unitário, isto é,  $K=1$ .

### 2.2.1. Características estruturais do pavimento

Os materiais, módulos de resiliência, espessuras, coeficientes de Poisson e tensões admissíveis ( $\sigma_{adm}$ ) das camadas do pavimento são apresentados na Tabela 3. O cálculo das deflexões máximas admissíveis de cada camada do pavimento foi realizado com o auxílio do Programa Computacional Elsym 5 (*Elastic Layered System*), desenvolvido segundo modelo da teoria da elasticidade. As deflexões foram determinadas correspondentes às fibras superiores de cada camada. Neste cálculo considerou-se duas cargas de 2.050 kgf e raio da área de contato de 15 cm. Os parâmetros utilizados para as análises e as deflexões máximas admissíveis são apresentados na Tabela 3.

Cabe observar que as deflexões máximas admissíveis nas estruturas, onde foram utilizadas misturas com cimento de RCC (sub-trecho 1 -  $BG_{R}TC_{RCC}$  e sub-trecho 2 -  $BG_{N}TC_{RCC}$ ), foram calculadas adotando-se o mesmo valor do módulo de resiliência e coeficiente de Poisson de uma camada de brita graduada simples (BGS).

Os valores de módulo de resiliência apresentados na Tabela 3 foram extraídos da Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 – Projeto de pavimentação<sup>(14)</sup>.



Tabela 3 - Parâmetros de entrada para o cálculo das deflexões máximas admissíveis no Programa Computacional Elsym5.

Camada	Material	Módulo de resiliência (kgf/cm <sup>2</sup> )	Espessura (cm)	Poisson <sup>(*)</sup>	Deflexão máxima admissível (mm)
Revestimento	CBUQ <sup>(**)</sup>	35.000	5	0,30	***
Base	BGS ou misturas com cimento de RCC (BG <sub>R</sub> TC <sub>RCC</sub> e BG <sub>N</sub> TC <sub>RCC</sub> )	3.000	16	0,35	85 x 10 <sup>-2</sup>
Base	BGTC	70.000	16	0,20	
Sub-base	Bica corrida reciclada	2.500	15	0,35	127 x 10 <sup>-2</sup>
Subleito	Solo local	500	-	0,40	158 x 10 <sup>-2</sup>

(\*) Valores estimados de acordo com IP - 08/2004 (Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento);

(\*\*) Concreto betuminoso usinado a quente;

(\*\*\*) Apresentadas nos resultados do trabalho (Figura 6).

Para avaliar o desempenho das misturas cimentícias, a via (~200 m) foi dividida em quatro sub-trechos (sub-trecho 1, 2, 3 e 4), diferenciando-se apenas pelo material utilizado na camada de base do pavimento e em função do comprimento. Na Tabela 4 são apresentadas as dimensões dos sub-trechos executados no trabalho.

Tabela 4 - Dimensões do Trecho Experimental.

Local	Extensão (m)	Espessura da base (cm)	Largura das faixas de rodagem (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
<b>Sub-trecho 1:</b> Agregado reciclado + cimento de RCC (BG <sub>R</sub> TC <sub>RCC</sub> )	26,0	16	8,0	208,0	33,28
<b>Sub-trecho 2:</b> Agregado natural + cimento de RCC (BG <sub>N</sub> TC <sub>RCC</sub> )	40,5	16	8,0	324,0	51,84
<b>Sub-trecho 3:</b> Brita Graduada Tratada com cimento (BGTC)	44,0	16	8,0	352,0	56,32
<b>Sub-trecho 4:</b> Brita Graduada Simples (BGS)	106,0	16	8,0	800,0	135,68



Na Figura 2 são apresentadas as espessuras e materiais utilizados nas camadas do pavimento. Foi adotado um valor de CBR  $\geq 10\%$  no subleito de todos os sub-trechos. Já as espessuras da sub-base foram dimensionadas adotando-se um CBR  $\geq 56\%$  (energia normal), o que resultou em uma espessura da camada de 15 cm. Para todos os sub-trechos, o dimensionamento resultou uma espessura de 16 cm para a base e espessura de capeamento de 5 cm (CBUQ).

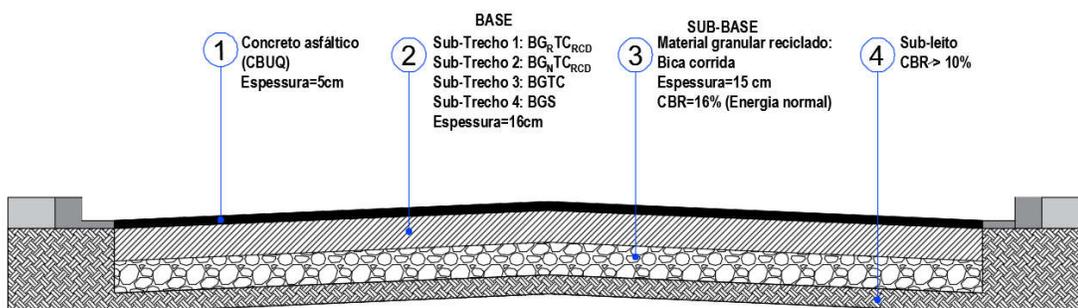


Figura 2 - Seções tipo do pavimento executado.

## 2.3. Ensaio de controle

### 2.3.1. Módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, conforme a norma técnica DNIT-ME 134/2010 – Pavimentação – Solos: Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio <sup>(15)</sup>. Após a compactação, todos os corpos de prova foram submetidos à cura úmida e os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de idade.

### 2.3.2. Análise deflectométrica

Os ensaios de deflexão foram realizados no pavimento executado de acordo com a norma DNER-ME 024/94 - Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman <sup>(16)</sup>. As medições deflectométricas foram realizadas na camada do revestimento final do pavimento.

As localizações dos pontos de deflexão medidos na via são apresentadas na Tabela 5. Os ensaios foram realizados a uma distância de 0,90 m da borda da via.

O conjunto de rodas duplas traseiras do caminhão foi centrado 0,90 m da trilha externa, ficando o seu eixo traseiro perpendicular ao eixo da pista de rolamento. A ponta da viga Benkelman foi posicionada



entre os pneus da roda dupla. Após o posicionamento da ponta da viga na vertical do eixo traseiro e assegurada a referência, a viga foi destravada e liberada.

Tabela 5 - Localização dos pontos de deflexão medidos na via urbana.

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância da borda do revestimento (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

Para as medições deflectométricas foi utilizado caminhão com eixo simples e roda dupla, pneus com pressão de 5,7 kgf/cm<sup>2</sup> e carga de 8,2 tf no eixo traseiro. As deflexões foram medidas ao longo de toda a via, no lado direito (LD) e no lado esquerdo (LE). Para cada lado, foram medidas deflexões na trilha de roda interna (TI) e trilha de roda externa (TE), conforme esquema apresentado na Figura 3.

O valor de deflexão apresentado foi o de deflexão característica, que é determinado por meio da soma da deflexão média e o desvio padrão dos resultados (deflexão média + 1 desvio padrão). O valor da deflexão característica pode ser utilizado como critério de aceitação de trechos de estruturas de bases de pavimentos <sup>(17)</sup>.

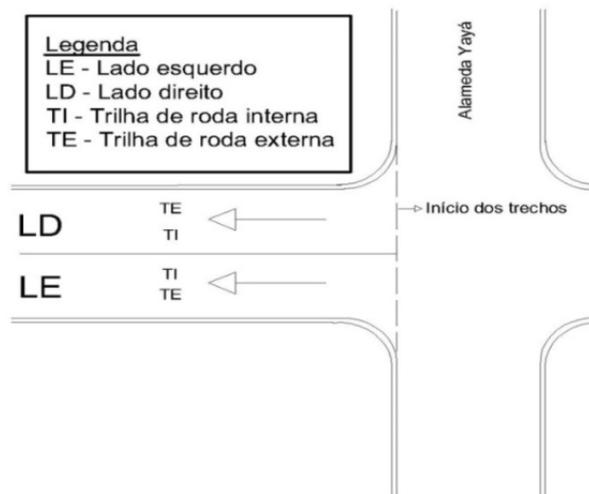


Figura 3 - Esquema com referências utilizadas para a execução do controle deflectométrico no trecho experimental.



### 3. RESULTADOS PARCIAIS

O trecho experimental foi executado na Rua Miguel Biondi, via urbana situada entre a Avenida Torres Tibagy e Alameda Yayá, no Município de Guarulhos, SP. A via foi selecionada em função de atender as características de tráfego (tráfego médio) e por constar no planejamento de manutenção das vias da cidade de Guarulhos-SP.

#### 3.1. Módulo de resiliência

As normas NBR 11803 <sup>(11)</sup> e NBR 12261 <sup>(18)</sup> indicam que materiais para base devem apresentar faixas granulométricas bem graduadas e adição de cimento da ordem de 4% em massa. Em termos de comportamento mecânico frente às solicitações cíclicas, geralmente o módulo de resiliência de materiais utilizados na execução de pavimentos deve apresentar valores da ordem de 3.000 kgf/cm<sup>2</sup> a 12.000 kgf/cm<sup>2</sup> <sup>(19)</sup>.

Os resultados de módulo de resiliência da BGR<sub>TCRCC</sub>, BGN<sub>TCRCC</sub>, nas idades de 7 e 28 dias, são apresentados na Figura 4, onde é possível verificar que somente a amostra BGR<sub>TCRCC</sub> não atingiu os resultados mínimos desta propriedade, obtendo valores inferiores a 3.000 kgf/cm<sup>2</sup>, conforme recomendado por <sup>(19)</sup>. No entanto, os resultados verificados para a amostra BGN<sub>TCRCC</sub> foram superiores a 3.000 kgf/cm<sup>2</sup>, comprovando a sua viabilidade para o uso em bases de pavimentos.

Outro fator importante observado nos resultados de módulo de resiliência (Figura 4) foi o aumento desta propriedade com a idade, verificando-se que o valor do módulo de resiliência aumentou, cerca de, 118% e 300% para as amostras BGN<sub>TCRCC</sub> e BGR<sub>TCRCC</sub>, respectivamente. Este comportamento também foi verificado nos resultados de deflectometria (ver item 3.2).

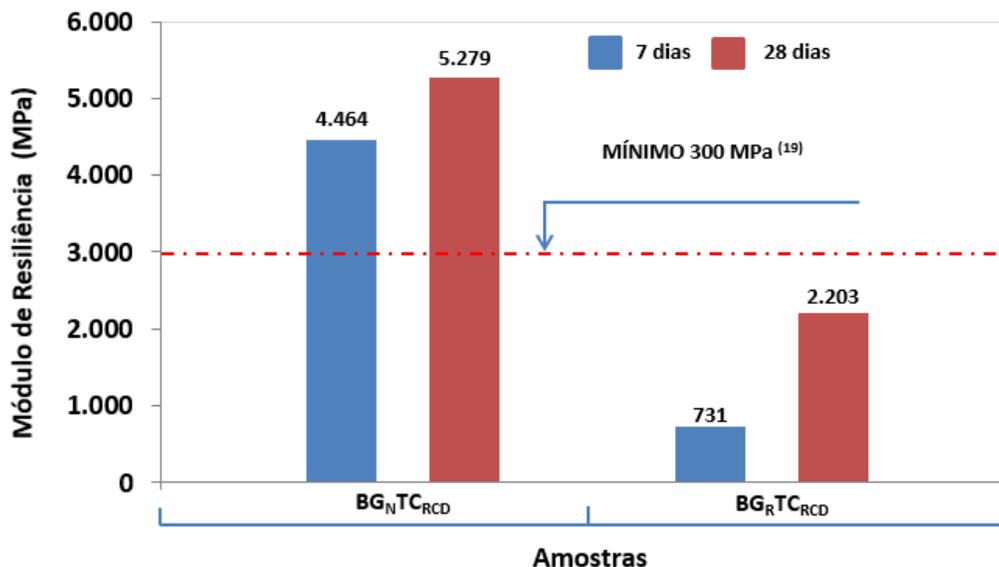


Figura 4 - Módulo de resiliência das misturas.

O menor desempenho de módulo de resiliência obtido para as amostras de BG<sub>R</sub>TC<sub>RCC</sub> pode ser explicado frente à diferença do comportamento mecânico dos agregados naturais e agregados reciclados, principalmente no que diz respeito ao módulo de elasticidade. Os agregados reciclados geralmente possuem menor resistência mecânica do que os agregados naturais, isto por que os agregados graúdos reciclados geralmente possuem uma camada de argamassa aderida e são mais porosos, o que influencia na absorção de água do agregado e, conseqüentemente, em diversas outras propriedades <sup>(20), (21)</sup>.

### 3.2. Análise deflectométrica

Na Figura 5 são apresentados os resultados de deflexão na camada de revestimento do pavimento durante a execução do Trecho Piloto. Observou-se que somente o sub-trecho 2 da sub-base apresentou deflexão acima da deflexão admissível determinado em projeto. Por outro lado, a deflexão no sub-leito e na base do pavimento foram, em média, 68% da deflexão admissível destas camadas.

Os resultados obtidos para o controle de compactação por comportamento resiliente no topo das camadas de subleito, sub-base e base indicam que o processo de compactação foi realizado de maneira eficiente, pois na maioria dos casos as deflexões apresentadas no topo das camadas foram inferiores a deflexão máxima admissível obtida pelo Elsym 5.



Somente no topo da camada de sub-base do sub-trecho 2, a deflexão característica medida em campo apresentou-se acima da deflexão máxima admissível. Por outro lado, observou-se que no topo da camada de base deste mesmo trecho a deflexão característica ficou abaixo da deflexão máxima admissível neste mesmo ponto. É importante ressaltar que em muitos casos onde o valor da deflexão obtida em campo é superior à deflexão admissível, isso não significa que a camada do pavimento não resista mecanicamente ao tráfego e carregamentos a qual está exposta. Este comportamento se deve, principalmente, à elevada dispersão dos dados neste tipo de ensaio <sup>(22)</sup>.

Os resultados de deflexão do trecho experimental obtidos em 4 meses e 8 meses após a execução podem ser observados na Figura 6. Os resultados obtidos nesta análise mostraram que as deflexões nos trechos com cimento de RCC (BG<sub>R</sub>TC<sub>RCC</sub> – sub-trecho 1 e BG<sub>N</sub>TC<sub>RCC</sub> – sub-trecho 2) foram intermediárias às obtidas nos sub-trechos executados com BGTC (sub-trecho 3) e com BGS (sub-trecho 4).

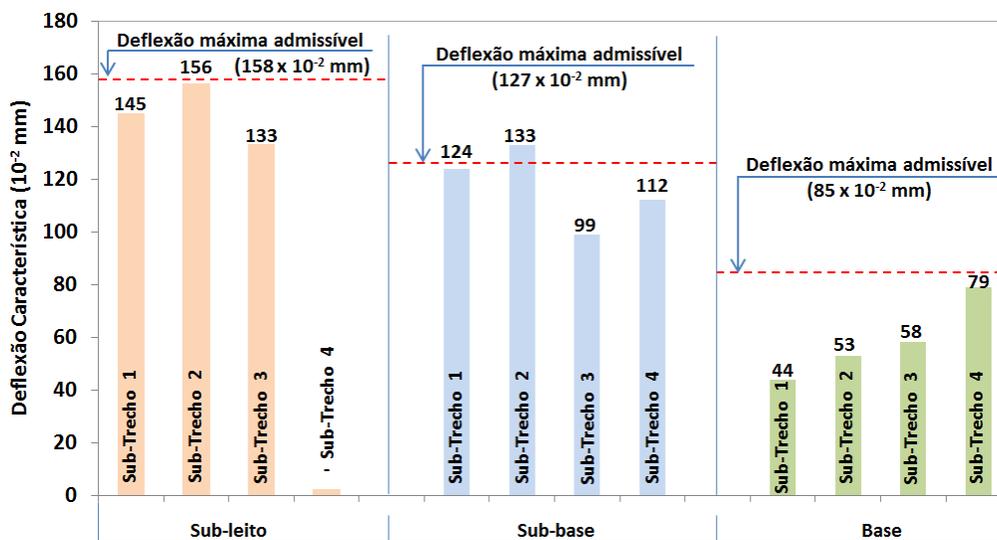


Figura 5 - Deflexão nas camadas do pavimento durante a execução do trecho experimental.

Na idade inicial (após a execução), foi possível verificar que o sub-trecho 1, executado com cimento de RCC e agregado reciclado (BG<sub>R</sub>TC<sub>RCC</sub>), apresentou maiores valores de deflexão do que o sub-trecho 2, executado com cimento de RCC e agregado natural (BG<sub>N</sub>TC<sub>RCC</sub>), indicando menor deformação do último, o que também indica maior tendência de durabilidade <sup>(23)</sup>. Este comportamento também pode ser explicado pela menor rigidez desta camada, pois a BG<sub>R</sub>TC<sub>RCC</sub> foi o material com módulo de resiliência mais baixo obtido no ensaio (Figura 8), o que ocorre pela sua maior porosidade



e, conseqüentemente, menor massa específica aparente seca o que pode diminuir o módulo de resiliência.

Os resultados apresentados na Figura 6 mostraram uma tendência de redução da deflexão no revestimento do pavimento com o decorrer do tempo. A redução da deflexão em função do tempo pode ser explicada porque nos primeiros meses após a execução as camadas do pavimento estão em fase de consolidação e, dessa forma, as deflexões apresentadas serão maiores <sup>(19)</sup>, com as solicitações do tráfego ocorridas neste período a estrutura ficará estável e atingirá a fase elástica.

Nos sub-trechos 1, 2 e 3 além da consolidação inicial dos materiais pode ter ocorrido contribuição da presença de base cimentada para a diminuição das deflexões ao longo do tempo, conforme apresentado a seguir.

- **Sub-trecho 1, 2 e 3:** como estes sub-trechos utilizam camada de base cimentada, ou seja, há ligante em sua composição, a hidratação do cimento pode ter proporcionado aumento da resistência mecânica e do módulo de resiliência com o tempo, elevando a rigidez da camada de base e contribuindo assim com a diminuição da deflexão;
- **Sub-trecho 4:** Para o trecho executado com BGS, a diminuição da deflexão é devida principalmente a fase de consolidação, pois com a passagem de veículo sobre a via, há uma acomodação das partículas e conseqüente aumento da rigidez da estrutura.

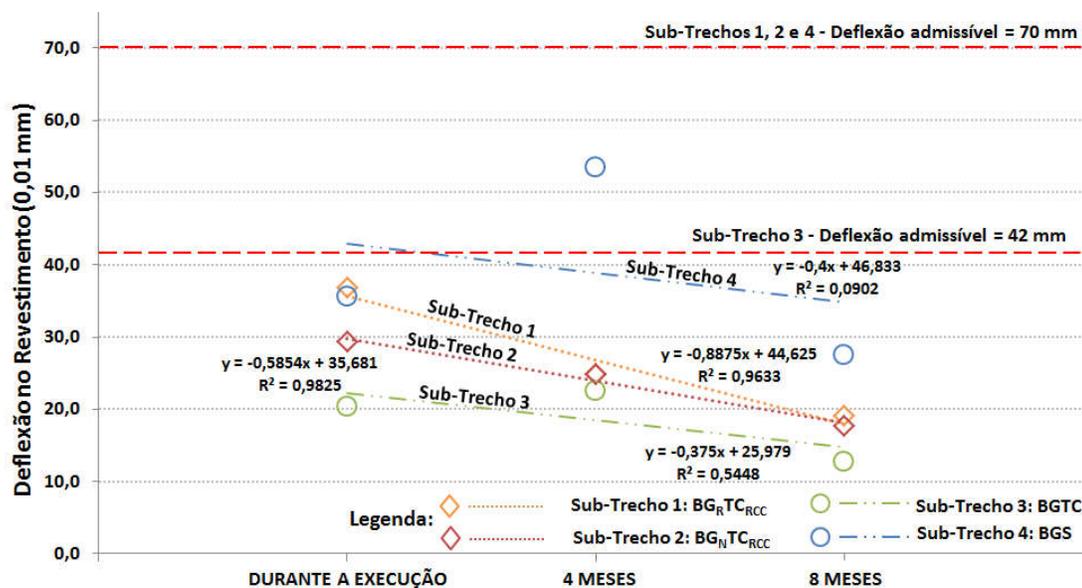


Figura 6 - Deflexão no revestimento durante a execução, após 4 meses e 8 meses de execução do Trecho.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve o objetivo de apresentar os resultados de deflexões obtidos na execução do trecho experimental de pavimento executado com cimento de RCC.

De forma geral, foi possível verificar que o uso de cimento de RCC pode ser considerado viável tecnicamente, apresentando potencialidade de uso e atendimento às necessidades para aplicação em obras de pavimentação de vias urbanas.

As avaliações deflectométricas mostraram que os trechos executados com cimento de RCC tiveram comportamento intermediário aos obtidos para os trechos executados com BGTC e BGS e que o tempo/idade tem contribuído para a diminuição da deflexão do pavimento, que provavelmente está ocorrendo pelo aumento da rigidez da camada em função da reação pozolânica no cimento de RCC, comprovando com o aumento do módulo de resiliência observado nos ensaios de laboratório.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos pelo apoio na execução do trecho experimental às seguintes empresas: Fiori do Brasil (Fiori Group), Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos (Proguaru), em nome dos funcionários Deborah Oliveira e Claudemir Ferreira de Mello. Os autores também agradecem à InterCement e ao BNDES pelo financiamento do projeto.

#### 6. REFERÊNCIAS

1. VAZQUEZ, E. **Progress of Recycling in the Built Environment: Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE**, 2013.
2. CARDOSO, R.; SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, **Waste Manag.** 49 (2016) 131–145.
3. ÂNGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**, Universidade de São Paulo, 2005.
4. ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**, Universidade de São Paulo, 2011.
5. GUILGE, M.S. **Desenvolvimento de ligante hidráulico a partir de resíduos de Cimento Hidratado, Tijolo Cerâmico e Metacaulinita**, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2011.
6. SHUI, Z.; XUAN, D.; CHEN, W.; YU, R.; ZHANG, R. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures, **Constr. Build. Mater.** 23 (2009) 531–537.



7. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). Inovações na Pavimentação Urbana - Perspectivas Outubro/2017. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/ACESSO%20WEB%20novo/NORMAS%20TECNICAS/PALESTRAS%20SEMINARIO%202017/20171025\\_seminariopavimentacaourbana\\_secretariodesmso.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/ACESSO%20WEB%20novo/NORMAS%20TECNICAS/PALESTRAS%20SEMINARIO%202017/20171025_seminariopavimentacaourbana_secretariodesmso.pdf). Acesso em: 14/06/2019.
8. SHUI, Z.; XUAN, D.; WAN, H.; CAO, B. Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment, **Constr. Build. Mater.** 22 (2008) 1723–1729.
9. XUAN, D.X.; SHUI, Z.H. Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature, **Fire Mater.** 35 (2011) 481–490.
10. SILVA, R. B. **Reidratação de cimento de alto-forno: Análise e otimização por técnicas combinadas de caracterização**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11803** - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
12. DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM (DER). **ET-DE-P00/008** – Sub-base ou base de brita graduada. Rio de Janeiro, 2005.
13. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). **IP-04** - Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio. São Paulo, 2004.
14. DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM (DER). **ET-DE-P00/001** – Projeto de pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.
15. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ME 134** – Pavimentação – Solos: Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.
16. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **ME 024** – Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.
17. SALVIANO, W. R. A. **Análise do controle construtivo de um pavimento semirrígido por deflexão**. Dissertação. Mestrado COOPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12261** – Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.
19. BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA. 501p. 2007.
20. GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduo de concreto – Um novo material para dosagens estruturais**. Dissertação – Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2001.
21. BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. **Constr. Build. Mater.** 74 (2015) 132-139.
22. FERRI, S. et al. **Proposição de metodologia para análise de risco em estruturas de pavimentos asfálticos flexíveis**. Transportes, v. 25, n. 1, 2017.
23. MACEDO, F. N. **Retroatálise de bacias de deflexão reais e teóricas obtidas por métodos estáticos e dinâmicos**. Dissertação. Universidade de Brasília. Brasília 2003.



## Argamassa autonivelante com fibras de polipropileno

**Luiz Claudio dos Santos Matni<sup>(1)</sup>; Prof. Dr Bernardo Borges Pompeu Neto<sup>(2)</sup>; Prof. M.Sc. Marco Antônio Barbosa de Oliveira<sup>(3)</sup>; Prof. Dr. Dilson Nazareno Pereira Cardoso<sup>(4)</sup>.**

(1) Universidade Federal do Pará (UFPA) – claudiomatni@gmail.com; (2) Universidade Federal do Pará (UFPA) – pompeu@ufpa.br; (3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tec. do Pará (IFPA) – marco.ufra@gmail.com; (4) Universidade Federal do Pará (UFPA)

### RESUMO

A indústria da Construção Civil tem evoluído e modernizado seus sistemas construtivos em diversos aspectos. Argamassas autonivelante apresentam alto desempenho, ótima fluidez, velocidade de execução e consequentemente aumento de produtividade. Porém, ainda são pouco utilizadas em razão da ausência de normas vigentes no País. Manifestações patológicas como falta de aderência, exsudação, segregação, retração e fissuras, tem sido observadas em alguns casos. Neste sentido, visando combater estes efeitos, este artigo apresentará a avaliação reológica desta argamassa, suas propriedades no estado fresco e seu comportamento mecânico no estado endurecido quando adicionadas fibras de polipropileno. O programa experimental consiste na dosagem de argamassa de referência (sem fibras) e com fibras de polipropileno em diferentes teores teóricos, a partir de ensaio reológico, consistência (Cone de fluxo de queda) e tempo de fluxo (Funil-V), recomendadas pela Norma Europeia EFNARC (2002). A caracterização e o controle da argamassa no estado fresco ocorrerão através de ensaio de retenção de fluxo. Os resultados esperados buscam avaliar a eficácia das fibras de polipropileno na redução dos efeitos da retração e fissuração.

**Palavras-chave:** Argamassa autonivelante, Fibras de polipropileno, Consistência, Fluidez.

## Self-leveling mortar with polypropylene fibers

### ABSTRACT

The Civil Construction industry has evolved and modernized its construction systems in several aspects. Self-leveling mortars have high performance, excellent flowability, speed of execution and consequently increased productivity. However, they are still little used because of the absence of norms in force in the country. Pathological manifestations such as lack of adherence, exudation, segregation, retraction and fissures have been observed in some cases. In this sense, in order to combat these effects, this article will present the rheological evaluation of this mortar, its properties in the fresh state and its mechanical behavior in the hardened state when polypropylene fibers are added. The experimental program consists in the determination of the reference mortar (without fibers) and polypropylene fibers in different theoretical contents, from the rheological test, the consistency (Fall flow cone) and the flow time (Funil-V) recommended by European Standard EFNARC (2002). Characterization and control of the mortar in the fresh state will occur through a flow retention test. The expected results seek to evaluate the effectiveness of polypropylene fibers in reducing the effects of retraction and cracking.

**Key-words:** Self-leveling mortar, Polypropylene fibers, Consistency, Fluidity.



## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Lopes da Silva (2016), na Europa, argamassa autonivelante já é bastante utilizada em grande escala, sendo até mesmo produzida por empresas especializadas. Já no Brasil ainda não há literatura renomada e muito menos norma específica para este compósito cimentício.

Sabe-se, contudo, que a vantajosidade que esse produto representa vai ao encontro das necessidades por processos mais otimizados, produtivos, economicamente viáveis e não menos importante, contribuíam com o meio ambiente, como neste caso em que a quantidade de consumo de cimento é bem reduzida se comparada ao método tradicional (farofa), e durabilidade representa menos manutenção.

A argamassa autonivelante é um produto constituído basicamente por formulações a partir de cimento, areia com granulometria selecionada, água e aditivos químicos. Sua principal característica é a elevada fluidez, que permite preencher os espaços vazios e se auto adense no local aplicado, apenas sob o efeito da gravidade e de sua capacidade de fluxo. A argamassa proporciona um melhor espalhamento na área desejada, minimizando os defeitos que possam ser provenientes de falhas de aplicação ou ainda de técnicas inadequadas de moldagem (MARTINS, 2009).

Atrelado a estas vantagens técnicas e econômicas, também se observa variados e importantes estudos que relacionam o uso de fibras nas matrizes cimentícias, visando obter novas características em desempenho no combate à manifestações patológicas. Somando-se a isso, a cinza do caroço do açaí surge como alternativa que pode substituir parcialmente o cimento na argamassa com desempenho satisfatório.

Hamoy (2017) observou nas obras da região metropolitana de Belém e também em outras cidades brasileiras, o emprego de misturas sem controle dos parâmetros reológicos, com fissuração, exsudação excessiva na superfície, baixa resistência de aderência e de abrasão, pega e endurecimento retardado. Verificou também problemas inerentes à execução como a falta de controle da espessura, ausência de preparo do substrato e disposição de juntas, segregação durante o bombeamento, problemas estes que levam também à ocorrência de fissuração e destacamento da argamassa.

As argamassas autonivelantes possuem pouca utilização, e até algumas restrições de uso, não havendo, ainda, normas vigentes no Brasil, carecendo de pesquisas e estudos bibliográficos sobre o comportamento e propriedades dessas argamassas.



Este trabalho tem como objetivo principal, a partir dos experimentos propostos, avaliar o comportamento dessas argamassas quanto aos requisitos e propriedades, quando adicionadas fibras de polipropileno (PP) e substituição parcial do cimento por cinza do caroço de açaí, no estado fresco, analisando a consistência e o tempo de fluxo das misturas no sentido de constatar se estas alcançam os parâmetros técnicos para serem classificadas como autonivelantes.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para evidenciar a teoria estudada, o programa experimental utilizou como metodologia algumas referências bibliográficas que pesquisaram a incorporação de fibras sintéticas em argamassas, de onde foi possível definir o traço das argamassas estudadas, os teores de adição de fibras de polipropileno (PP), aditivos e demais materiais a seguir especificados.

Inicialmente foi determinada a argamassa de referência (traço 1:2; a/c 0,5 e 0,65% de aditivo superplastificante) respeitando os parâmetros dos ensaios de consistência e tempo de fluxo, conforme ASTM C1708/C1708M (2016). A partir de então, foram ensaiadas proporções experimentais com cimento, areia, água potável, aditivo superplastificante, adições de fibras (PP) e substituições percentuais de cimento por cinza de caroço de açaí.

### 1.1. Materiais

No presente estudo utilizou-se de cimento do tipo Portland do tipo CP II-E-32, o cimento Portland CPII E-32, NBR 11.578 (ABNT, 1991), marca POTY, classe de resistência a compressão 32, resistência mínima à compressão que o aglomerante atinge em MPa aos 28 dias de idade, fornecido em embalagens de 50 kg. O CP II-E é constituído de 94% à 66% de clínquer e gesso e de 6% à 34% de escória granulada de alto forno. Possui baixo calor de hidratação, alta resistência a sulfatos e contribui no aumento de resistência mecânica. Quanto aos agregados miúdos decidiu-se optar por areia natural. Segundo o fornecedor, a areia é oriunda do município de Castanhal - Pa, distante 74 km da cidade de Belém. Na dosagem das argamassas foi indispensável a utilização de aditivos para se obter a característica de alta fluidez. Nesta pesquisa, o aditivo utilizado foi o Sika ViscoCrete® 3535 CB, que é um redutor de água superplastificante de pega normal.

Para análise proposta no procedimento experimental deste trabalho, foram dosadas argamassas autonivelante com adição de fibras de polipropileno (PP) no teor de utilização do mercado de acordo



com a especificação e parâmetros técnicos do fabricante, ou seja, 600 g/m<sup>3</sup>. FibroMac® 12 é uma fibra de polipropileno produzida a partir de multifilamentos indicada para o reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração (FABRICANTE, 2008). Para produção das argamassas foi utilizada água potável fornecida pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

A pesquisa analisou o comportamento da argamassa com a substituição parcial do cimento de cinza do caroço de açaí. Esta cinza é oriunda de fábrica no Município de Castanhal no Pará que obtém caroços nos diversos pontos de coletas do Município. O processo de obtenção da cinza ocorre pela perda de umidade por centrifugação e posterior separação de parte das fibras do mesocarpo do caroço e resíduos impregnados pelo processo de beneficiamento do açaí. Em seguida os caroços, com parte de fibra no mesocarpo, vão ao forno para queima da biomassa em temperatura aproximada de 250°C, com finalidade de coleta do vapor de calor para uso no processo da fábrica.

### 1.1.1 Caracterização

A tabela1 apresenta a caracterização granulométrica do agregado miúdo segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa específica conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009), e a massa unitária, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Tabela 1 - Composição Granulométrica da areia

<b>Peneiras – Série Normal</b>	<b>Amostra</b>	<b>Média dos Resultados</b>	
<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% Massa retida</b>	<b>% Retida acum.</b>
4,750	0,0	0,0 %	0,0 %
2,360	1,4	0,2 %	0,2 %
1,180	19,3	2,5 %	2,7 %
0,600	185,6	24,4 %	27,1 %
0,300	395,2	51,9 %	79,0 %
0,150	135,3	17,8 %	96,8 %
Fundo	24,5	3,2 %	100,0 %

Módulo de finura	2,06
Diâmetro máximo (mm)	1,18
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,64
Absorção de água	0,56 %
Material fino	1,45 %

Fonte: autores, 2019.



Tabela 2 – Características físicas e mecânicas do cimento.

Densidade específica (g/cm³)	Finura 75 µm (%)	Tempo de pega (min)		Resistência à compressão (MPa)		
		Início	Fim	3 dias	7 dias	28 dias
3,04	3,1	270	340	17,3	25,4	38,2

Fonte: fabricante, 2019.

Tabela 3 - Características químicas do cimento.

SO3 (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	K2O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe2O3 (%)	Na2O (%)	PF (%)	RI (%)
1,87	22,54	6,36	0,62	56,11	4,05	2,49	0,08	4,86	1,23

Fonte: fabricante, 2019.

Tabela 4 - Características físicas e mecânicas da fibra.

Comprimento (mm)	Diâmetro (µm)	Densidade específica (g/cm³)	Resistência à tração (Mpa)	Dosagem recomendada (g/m³)
12	18	0,91	300	600

Fonte: fabricante, 2019.

Figura 1 – Fibras de Polipropileno.



Fonte: <http://www.impervia.com.br/wp-content/uploads/2017/08/bc39de5fa5a00d507291bd9295935eef-synthetic-fibres-cellulose-600x537.jpg>



## 1.2. Parâmetros Reológicos

As propriedades mais importantes para as argamassas autonivelante no estado fresco são a consistência e a resistência à segregação. Evitar a segregação significa manter a mistura homogênea sem separação entre as partículas que a constituem (MARTINS, 2009).

Para que um material autoadensável tenha um ótimo desempenho, uma complexa combinação de propriedades da mistura no estado fresco como fluidez, coesão, trabalhabilidade, compatibilidade entre cimento-aditivos e viscosidade deverão ser trabalhadas harmonicamente (EFNARC, 2002 apud MARTINS, 2009).

## 1.3. Dosagem das argamassas

O traço utilizado na produção das argamassas para esta pesquisa foi 1:2 (cimento e areia) com teor inicial de a/c de 0,50 para atender os requisitos de desempenho. A adição de fibras aconteceu no teor de 1% (0,72g) em relação ao volume da matriz do compósito. Foram dosadas e ensaiadas 40 misturas com diferentes combinações de água e aditivo superplastificante, com fibra e sem fibras, com cinza e sem cinza. A tabela 5 apresenta as proporções de materiais consumidos para cada tipo de argamassa estudada.

Tabela 5 - Proporções para cada tipo de argamassa estudada.

Argamassa	Fibra		Cimento	Cinza		Areia	Água	Aditivo SP	
	(%)	(g)	(g)	(%)	(g)	(g)	(ml)	(%)	(g)
Referência	-	-	750	-	-	1500	375	0,65%	4,9
Com fibra	1%	0,72	750	5% - 10%	Var.	1500	Var.	0,65% - 0,95%	Var.
	1%	0,72	750	-	-	1500	Var.	0,65% - 0,95%	Var.
Sem fibra	-	-	750	5% - 10%	Var.	1500	Var.	0,65% - 0,95%	Var.

Fonte: autores, 2019.

Ensaio foram desenvolvidos para quantificar as proporções iniciais dos constituintes a fim de identificar uma primeira mistura (referência) e avaliar o comportamento de cada material (teores de adições, relação a/c, tipo e quantidade de aditivos) utilizado para posteriormente fazer ajustes dos constituintes que servirão de referência. Esses teores determinam as propriedades das argamassas no estado fresco.

Inicialmente a relação água/cimento (a/c) utilizada nesta etapa da pesquisa foi de 0,50 em consequência de alguns parâmetros fornecidos para as argamassas autonivelantes pesquisadas.



## 1.4. Ensaio

### 1.1.1 Consistência (Cone de fluxo de queda)

Para determinação da proporção ótima de água/pó volumétrica e dosagem de superplastificante em argamassa, foram realizados testes com Cone de fluxo e V-funil para argamassa. O superplastificante é utilizado para equilibrar a reologia da pasta. O teor de volume de areia na argamassa permanece o mesmo que o determinado acima.

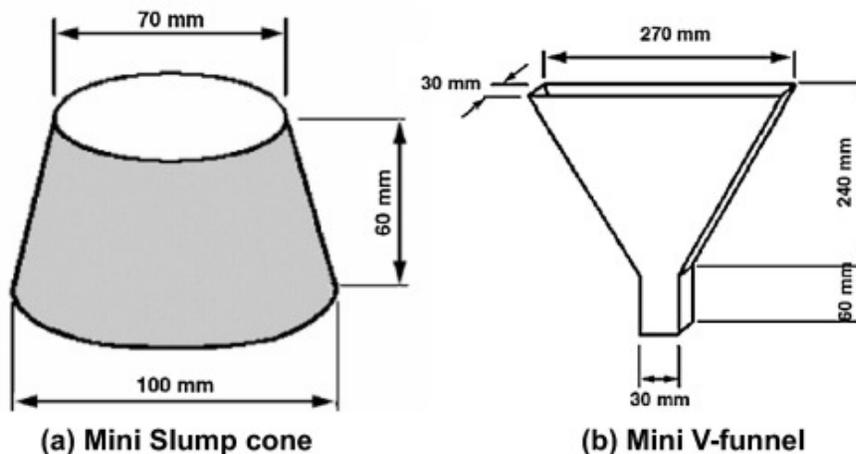
Os valores-alvo são o fluxo de queda de 24 a 26 cm e V-funil tempo de 7 a 11 segundos.

### 2.1.1 Tempo de fluxo (Funil –V)

Segundo a Norma Européia EFNARC (2002), no fluxo de queda do alvo, onde o tempo do V-funil é mais baixo de 7 segundos, deve ser diminuída a relação da água/pó. Para o fluxo de queda do alvo e o tempo do V-funil em excesso de 11 segundos, a relação da água/pó deve ser aumentada.

Se estes critérios não puderem ser cumpridos, então a combinação particular de materiais é inadequada. Uma análise com um superplastificante diferente é uma alternativa para atingir esses parâmetros. No nosso caso, os critérios foram atingidos seguindo a regra geral.

Figura 2 – Cone e Funil de tempo de fluxo.



Fonte: Norma Européia EFNARC (2002).

Figura 3 – Cone de fluxo.



Figura 4 – Verificação da consistência.



Figura 5 – Determinação do tempo de fluxo da mistura.



Fonte: autores, 2019.

Resultados dos ensaios de consistência e tempo de fluxo para os parâmetros reológicos na fase de dosagem da argamassa autonivelante de referência conforme ASTM C1708/C1708M (2016).

Tabela 6 – Consistência e Tempo de Fluxo da argamassa de referência.

Tentativa	Aditivo SP (%)	Consistência (cm)			Tempo de Fluxo (s)
		D1	D2	D médio	
1ª	0,30	22,00	21,50	21,75	4,0
2ª	0,50	21,00	21,50	21,75	4,0
3ª	0,70	34,50	34,50	34,50	3,5
4ª	0,60	24,00	24,50	24,25	4,5
5ª	<b>0,65</b>	<b>26,00</b>	<b>26,00</b>	<b>26,00</b>	<b>7,0</b>

Fonte: autores, 2019.



Para atender os parâmetros recomendados pela Norma Europeia EFNARC (2002), foram feitas várias tentativas com dosagens de argamassas a partir da referência, com e sem fibras de polipropileno e diferentes teores de cinza do caroço de aço a partir dos ensaios de consistência (Cone de fluxo de queda) e tempo de fluxo (Funil-V). Os resultados estão ilustrados nos gráficos abaixo.

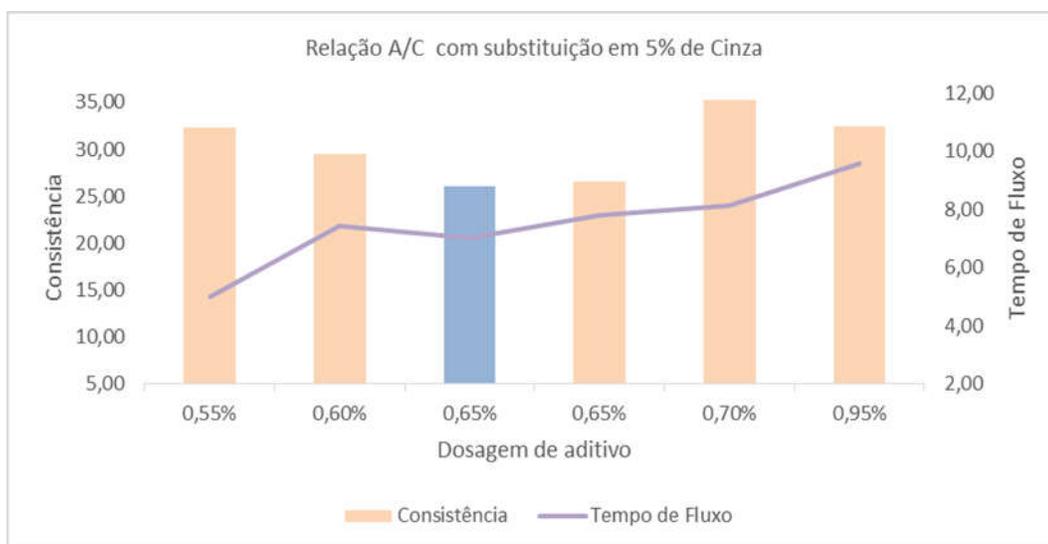
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 2.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

##### 3.1.1 Índice de consistência e tempo de fluxo – Sem fibras.

Os ensaios realizados nas dosagens para argamassas com percentual de 5% de cinza em substituição ao cimento, oscilaram dentro dos limites de 0,55% a 0,95%, porém somente no percentual de 0,65% foi possível enquadrar nos requisitos do tempo de fluxo (tempo de fluidez de 7 a 11 segundos) e consistência (diâmetro entre 24cm e 26 cm), ficando claro, neste caso, que mantendo a relação água/cimento, a substituição da cinza não é o grande diferencial e sim a quantidade de aditivo na mistura.

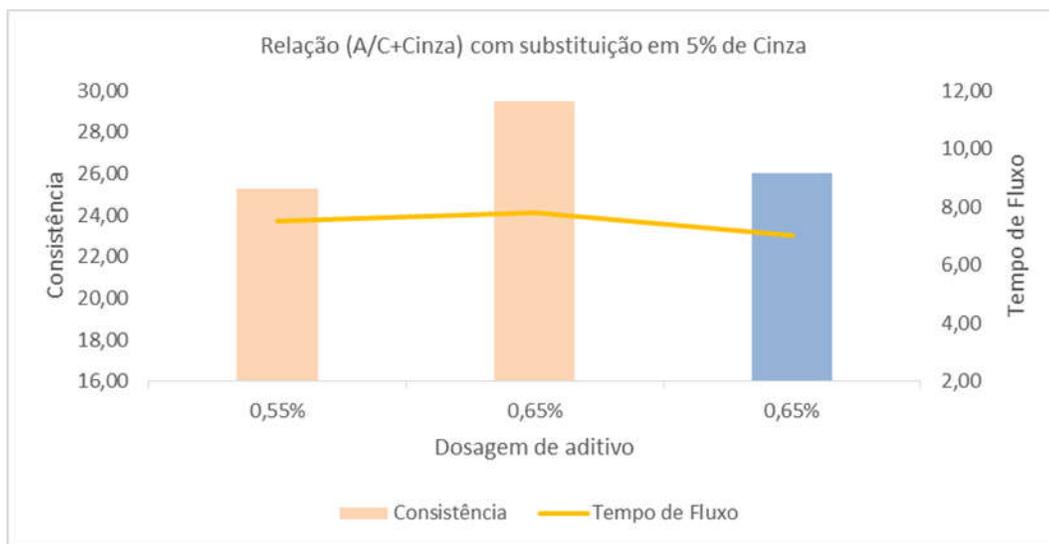
Figura 6 – Gráfico argamassa sem fibra e 5% de cinza.





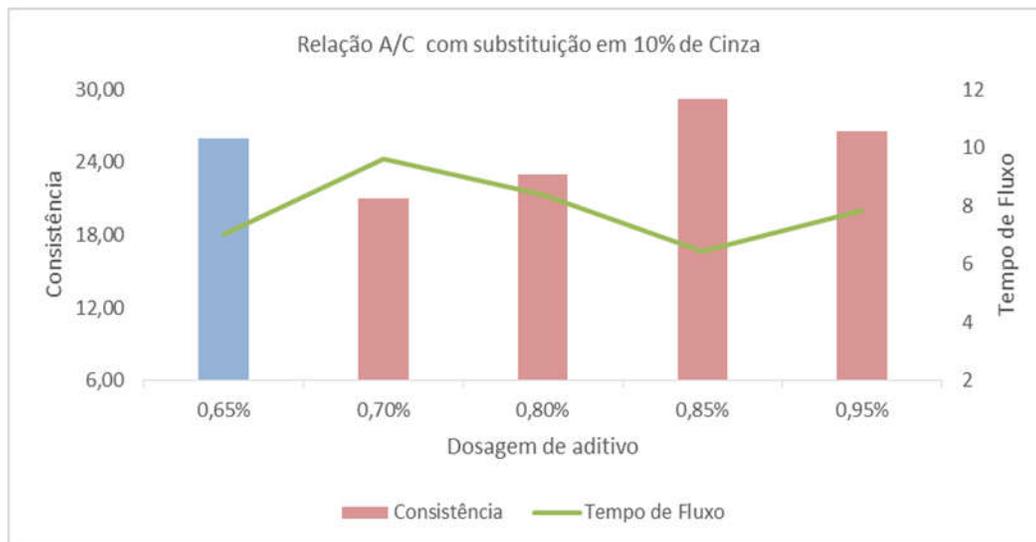
As argamassas dosadas e ensaiadas nessas proporções, demonstraram que somente com 0,55% de aditivos, com percentual de 5% de cinza em substituição ao cimento e com a relação água/cimento + cinza, foi possível manter a consistência e o tempo de fluxo da mistura nos padrões aceitáveis.

Figura 7 – Gráfico argamassa (a/c+cinza) sem fibra e 5% de cinza.



Verificou-se que mesmo mantendo o fator água/cimento da argamassa de referência, a substituição do cimento por cinza no percentual de 10%, teve os requisitos do tempo de fluxo (fluidez de 7 a 11 segundos) e consistência (diâmetro entre 24cm e 26 cm), atendidos na quantidade de aditivo de 0,95%, podendo ser considerada autonivelante para essa dosagem.

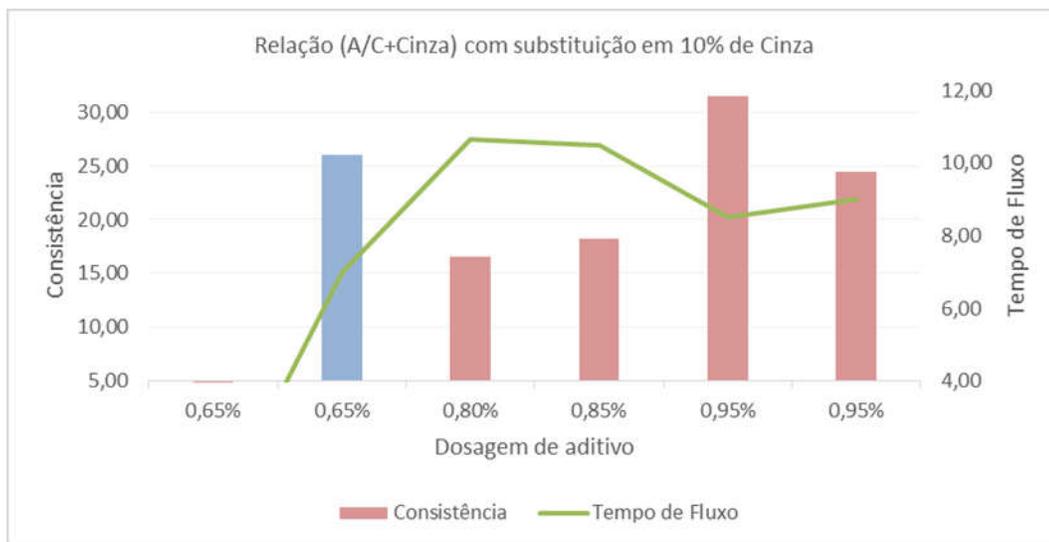
Figura 8 – Gráfico argamassa sem fibra e 10% de cinza.





A diminuição de água nas misturas estudadas elevou a quantidade de aditivo para 0,95%, porém a substituição do cimento por cinza no percentual de 10% foi positiva, dada economia de cimento.

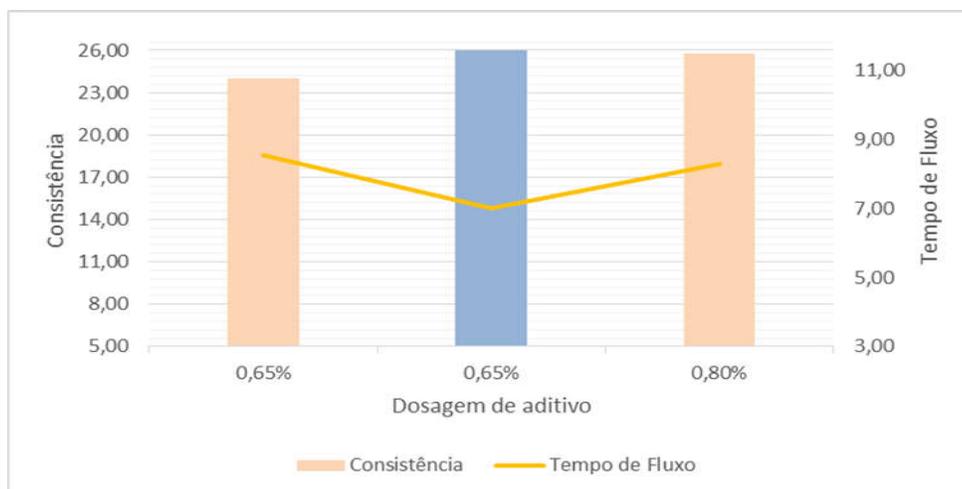
Figura 9 – Gráfico argamassa (a/c+cinza) sem fibra e 10% de cinza.



### 3.1.1 Índice de consistência e tempo de fluxo – Com fibras.

Tanto o fator água/cimento como a dosagem de aditivo, influenciaram na variação da consistência da argamassa. Neste caso, os limites de 0,65% a 0,80% de aditivos atendem o requisito do tempo de fluxo (fluidez de 7 a 11 segundos). Por outro lado, o percentual de 5% de cinza em substituição ao cimento aumenta a fluidez, e a adição de fibras de PP diminui a consistência da mistura deixando-a menos densa.

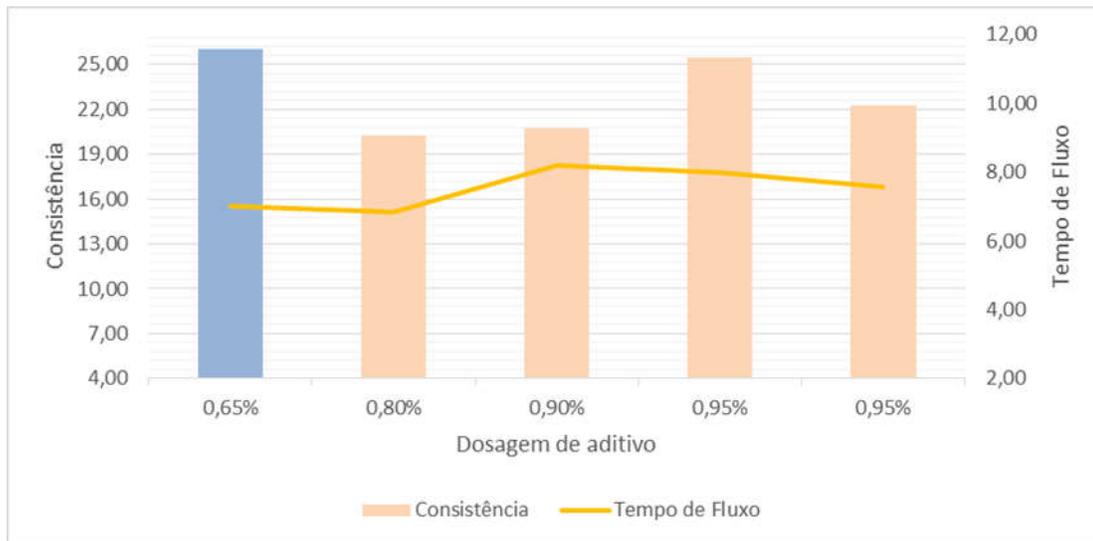
Figura 10 – Gráfico Argamassa com Fibras e Substituição em 5% de Cinza





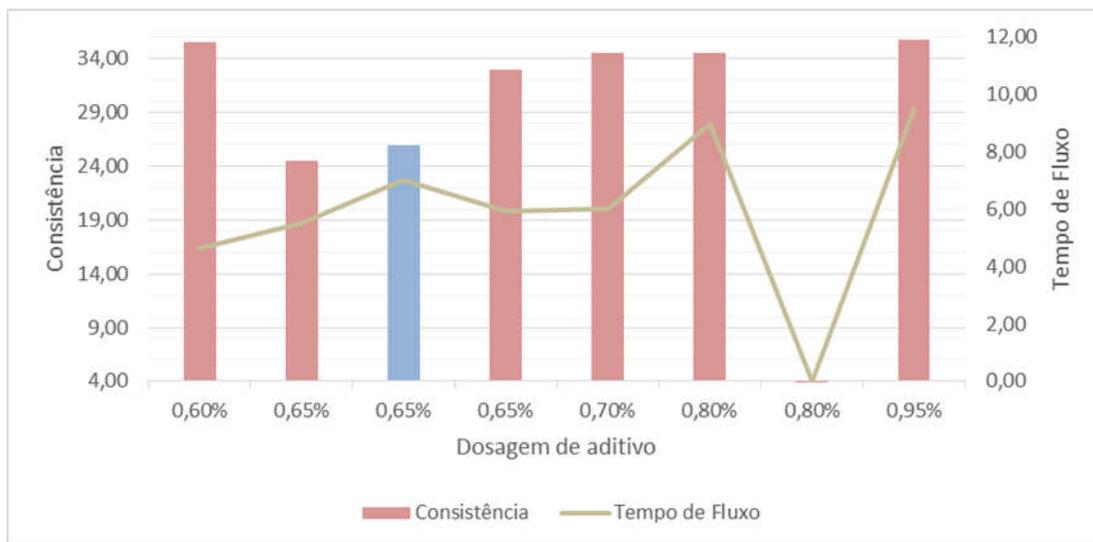
Já o percentual de 10% de cinza em substituição ao cimento só atendeu os parâmetros da EFNARC (2002) quando na dosagem de 0,95% de aditivo para o mesmo teor de fibras de PP e fator água/cimento.

Figura 11 – Argamassa com Fibras e Substituição em 10% de Cinza.



Neste caso, a argamassa com fibra e sem cinza, mostrou um comportamento semelhante a argamassa de referência para um percentual de 0,65% de aditivo, enquadrando-se aos parâmetros de consistência e tempo de fluxo.

Figura 12 – Argamassa com fibras e sem cinzas





## 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que ocorreram particularidades interessantes no comportamento das argamassas, uma vez foi possível classifica-las como autonivelantes dados os aspectos técnicos atendidos com as modificações propostas.

Já se sabe que a cinza do caroço de açaí tem grande potencial para atuar na matriz cimentícia nos percentuais de 5% e 10% em substituição ao cimento, sem prejuízos das propriedades das argamassas no estado fresco, e que o caráter econômico e sustentável poderá incentivar outras pesquisas.

Nessas condições, também é possível afirmar que a fibra de PP atua matriz diminuindo a consistência da mistura e aumentando o tempo de fluxo, e quando atua com a cinza produz resultados limitados.

Outro ponto que merece destaque aponta para necessidade de controle do fator água/cimento, que pode ser dimensionado em função do teor de aditivo exigido para mistura de forma a não prejudicar outras propriedades desejadas para as argamassas autonivelantes

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPA Campus Belém por disponibilizar o Laboratório de Concreto para realização dos ensaios; à UFPA na pessoa do Prof. Dr. Dilson Nazareno Pereira Cardoso, pela contribuição no ensaio com viscosímetro; e finalmente, mas não menos importante, ao Pólo de Protecção da Biodiversidade e Uso Sustentável dos Recursos Naturais – Poloprobio, Prof. Francisco Samonek, por doar as cinzas do caroço de açaí.



## 6. REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. 2005.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6467. Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. 2006.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23. Cimento portland - Determinação e massa específica. 2000.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2003.
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30. Agregados miúdos - Determinação da absorção de água. 2000.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 1996.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1998.
- 9 CARASEK, H., 2007. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, Ibracon.
- 10 COLOMBO, Felipe Sachet, ANTUNES, Elaine Guglielmi Pavei. **Análise das propriedades físico-mecânicas de argamassas de revestimento com a incorporação de fibras de polipropileno e nylon** - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2017.
- 11 EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. Specification & guidelines for polymer- modified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use. United Kingdom, 2001
- 12 FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. 2011. 247 p. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- 13 FIORITO Antonio J.S.I. **Manual de argamassas e revestimentos** : estudos e procedimentos de execução [Livro]. - São Paulo : Pini, 2009.
- 14 GOMES, A. O.; GONÇALVES, J. P. **Inovações tecnológicas em canteiros de obras**. X SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Fortaleza, 2013.
- 15 LOPES DA SILVA, S. H. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 2016.
- 16 NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. **Pisos Auto-nivelantes. Propriedades e Instalações**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997.



- 17 RUBIN, A. P. Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desenvolvimento físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- 18 SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo do comportamento reológico e mecânico.** São Paulo, 2006. 191p. Dissertação em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- 19 SILVA, R. P.; BARROS, M. D. B.; JOHN, V. M. **Influência do método de mistura na produção de argamassas com fibras.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, VII. *Anais...*Recife, 2007.
- 20 SOUZA, Natália Cerqueira de. **Análise de desempenho do contrapiso autonivelante em relação ao sistema tradicional.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. – 2013.
- 21 TISCOSKI, Bruna De Luca; ANTUNES, Bruna De Luca. **análise do efeito da adição de fibras de polipropileno na resistência de aderência à tração em argamassa de revestimento -** Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2016.



# ANÁLISE DO USO DE AREIA DE BRITAGEM EM SUBSTITUIÇÃO À AREIA NATURAL NA FABRICAÇÃO DE PAVERS

**Natália Bach<sup>(1)</sup>; Beatriz Schimelfenig<sup>(2)</sup>; Jéssica Woitysiak<sup>(3)</sup>; Gabriel Dalla Vechia<sup>(4)</sup>; Suelen Vanzetto<sup>(5)</sup>**

(1) URI- Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões -  
[natalia.smaniotto@hotmail.com](mailto:natalia.smaniotto@hotmail.com)

(2) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [biaschimmel@hotmail.com](mailto:biaschimmel@hotmail.com)

(3) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [jessikawoitysiak@hotmail.com](mailto:jessikawoitysiak@hotmail.com)

(4) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - [gabriel-ldv@hotmail.com](mailto:gabriel-ldv@hotmail.com)

(5) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [suelen.van@hotmail.com](mailto:suelen.van@hotmail.com)

## RESUMO

A areia natural utilizada em concretos vem se tornando cada vez mais escassa, devido ao esgotamento das jazidas, bem como às restrições impostas pelos órgãos de fiscalização ambiental para a extração. Uma alternativa é o uso da areia de britagem, que tende a diminuir os danos gerados ao meio, além de ter um custo reduzido. A pesquisa tem por objetivo avaliar a substituição da areia natural por areia de britagem na fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado. Inicialmente, definiu-se um teor de referência (0%) e realizou-se o emprego de teores crescentes de substituição da areia natural por areia de britagem em 25% e 50%. Após a concretagem das peças, avaliou-se a sua utilização por meio de ensaios de resistência à compressão, absorção de água, análise visual e avaliação dimensional. Após realizados os ensaios de resistência à compressão, aos 28 dias, os teores de 25% e 50% obtiveram um acréscimo de 23,17% e 26,86%, respectivamente, comparados ao teor referência. No teste de absorção de água, aos 28 dias, os teores 0% e 50% superaram o limite estabelecido por norma de 6%. De modo geral, algumas peças apresentaram defeitos de homogeneidade e presença de rebarbas.

**Palavras-chave:** Areia de britagem, pavimento intertravado, resistência à compressão.

## ANALYSIS OF THE USE OF CRUSHING SAND IN SUBSTITUTION TO THE NATURAL SAND IN THE PAVERS PRODUCTION

### ABSTRACT

The natural sand that is applied in concretes is becoming increasingly scarce, due to the depletion of the deposits, as well as the restrictions imposed by the environmental inspection body for the extraction. Once is the use of crushing sand, which reduces the damage generated in the environment, and to having a reduced price. The research has the goal of evaluating the natural sand by the crushing sand in the manufacture of concrete pieces for interlocking pavement. Firstly, a reference proportion (0%) was defined, growing proportions were then used, substituting the natural sand by the crushing sand, by 25% and 50%. After the concreting of the pieces, the use of compression strength, water absorption, visual analysis and dimensional evaluation were evaluated. After the tests of resistance to compression, at 28 days, the proportions of 25% and 50% obtained an increase of 23.17% and 26.86%, respectively, compared to the reference proportion. Water absorption test at 28 days, the proportions 0% and 50% exceeded the limit established by 6% standard. In general, some devices of defects of homogeneity and presence of burrs.

**Key-words:** Crushing sand, interlocked floor, compressive strength.



## 1. INTRODUÇÃO

A produção de agregados para construção civil foi de 519.000.000 toneladas no ano de 2015, 452.000.000 em 2016 e 420.000.000 em 2017<sup>(1)</sup>. A atividade da construção civil sempre se apresentou como um ramo importante no desenvolvimento social e econômico do nosso país. Atualmente, este setor implica em grandes preocupações devido aos impactos que vem causando ao ambiente, sendo responsável por 15 a 50% do consumo dos recursos naturais extraídos do planeta<sup>(2)</sup>.

A exploração não controlada associada a grande demanda por insumos naturais, vem ocasionando o esgotamento de grandes depósitos de um dos recursos mais utilizados: a areia natural. Por este motivo, os órgãos ambientais estão restringindo cada vez mais a extração deste recurso em leitos de rios, uma vez que estas atividades extrativistas provocam a retirada da cobertura vegetal e degradam às margens dos cursos d'água, áreas essas conhecidas como áreas de preservação permanente <sup>(3)</sup>.

Conforme estimativas conservadoras de um relatório publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) são 40 a 50 bilhões de toneladas de areia que desaparecem do ambiente natural por ano, concluindo que a extração natural com o passar do tempo ficará insustentável<sup>(4)</sup>.

A escassez da areia natural tem refletido no custo de transporte do material, devido à necessidade de extração em áreas distantes dos locais de consumo, elevando conseqüentemente o custo do metro cúbico de concreto, seja ele usinado ou fabricado na obra<sup>(3)</sup>.

A areia de britagem vem se apresentando há anos como uma alternativa ao emprego de adições minerais de resíduos aproveitados de processos de britagem na produção de concreto. Dentro as vantagens de se utilizar a areia produzida por processo de britagem estão a granulometria uniforme, garantida pelo beneficiamento e o formato arredondado dos grãos, e a ausência de matéria orgânica que coloca esta areia em destaque diante da areia natural, além da redução do custo com o transporte e ao impacto ambiental<sup>(5)</sup>.

Neste contexto, percebeu-se a oportunidade de unir a utilização da areia de britagem a uma técnica construtiva que vem sendo largamente utilizada em parques, praças, calçadas e ruas: o pavimento intertravado (*pavers*). A inexistência de limites quanto à capacidade de suporte do



pavimento, aliada a inúmeras opções de formato, cores e tamanhos permitem infindáveis possibilidades estéticas, podendo apresentar vida útil de pelo menos 25 anos <sup>(6)</sup>.

Nesse sentido, esta pesquisa visa à incorporação da areia de britagem na produção de *pavers*, em função da necessidade de se obter agregados alternativos baratos e que ainda reduzam os danos gerados ao meio ambiente, além de incentivar o desenvolvimento de estudos que verifiquem a viabilidade deste material na produção de concreto.

## 2. METODOLOGIA

A fim de avaliar o uso da areia oriunda da britagem de rochas na substituição da areia natural no confecção de *pavers* foram fixados teores de substituição em massa de 0% (referência), 25% e 50%. Como resposta foram realizados ensaios no estado endurecido de resistência característica à compressão e absorção de água, ambos aos 7 e aos 28 dias. O aspecto estético também foi avaliado através da análise visual, e avaliação dimensional. Todas as variáveis de resposta se relacionam diretamente com os critérios da NBR 9781<sup>(7)</sup> que estabelece os requisitos exigíveis para aceitação das peças de concreto para pavimentação intertravada.

A tabela 1 mostra o número de amostras que foram confeccionadas para determinada propriedade em cada combinação, totalizando a produção de 54 *pavers*.

Tabela 1 – Amostragem para ensaio

Propriedade	Nº de amostras
Estética	6a
Absorção da água	3a
Resistência à compressão	6
Total	9

a as peças amostradas podem ser utilizadas também para os ensaios de resistência à compressão<sup>(7)</sup>

### 2.1 Materiais

O cimento utilizado foi um Portland CP V ARI adotado pela necessidade de se obter a resistência mínima de 35 Mpa na elaboração do *paver* conforme a NBR 9781<sup>(7)</sup>. A sua massa específica é 3,04 g/cm<sup>3</sup> e no ensaio de resistência à compressão apresentou para 1, 3, 7 e 28 dias, respectivamente 23,6 MPa; 38 MPa; 44,5 MPa; e 55,5 MPa. O fabricante apontou a presença de 60,75% de óxido de cálcio (CaO), elemento majoritário presente na composição.



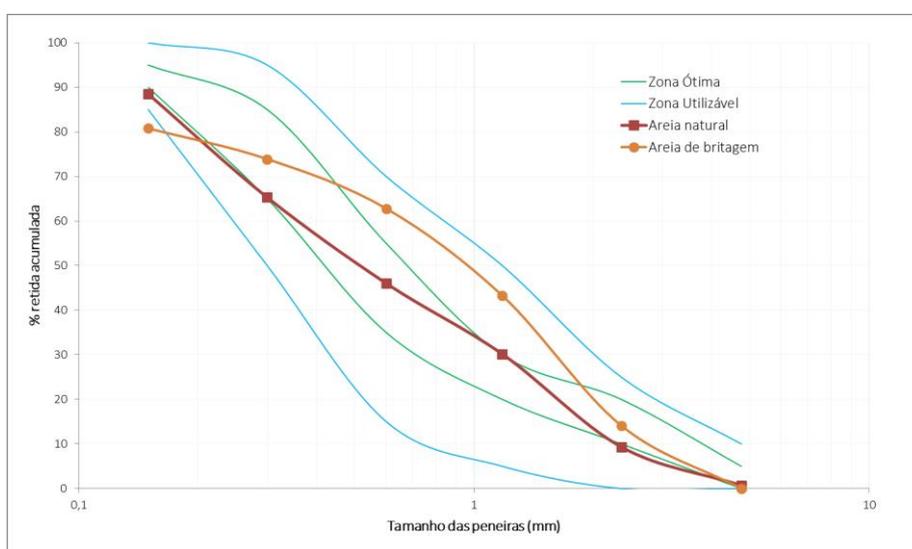
A areia de britagem empregada é oriunda da britagem de rochas para fabricação de areia artificial, material proveniente de uma indústria da cidade de Erechim/RS. Como agregado miúdo natural foi utilizada uma areia natural de origem quartzosa. Os resultados da caracterização física da areia de britagem foram determinados através dos mesmos ensaios que caracterizaram a areia natural conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do agregado miúdo natural e de britagem

Caracterização física	Agregado miúdo natural	Agregado miúdo de britagem	Método de ensaio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,91	NBR NM 52 <sup>(8)</sup>
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,55	1,52	NBR NM 45 <sup>(9)</sup>
Dimensão máxima (mm)	4,75	4,75	NBR NM 248 <sup>(10)</sup>
Módulo de finura	2,40	2,75	NBR NM 248 <sup>(10)</sup>
Absorção de água (%)	0,60	4,28	NBR NM 30 <sup>(11)</sup>

A figura 1 apresenta curva granulométrica da areia de britagem considerando os limites das zonas ótima e utilizável da ABNT NBR 7211<sup>(12)</sup>.

Figura 1 – Curva granulométrica da areia



O agregado reciclado para produção de concreto deve ser pré-umidificado antes de ser colocado em contato com o cimento por no mínimo 2 minutos<sup>(13)</sup>. Apesar da areia de britagem não se tratar de um agregado reciclado apresentou alto índice de absorção de água comparado a areia natural, devido a presença de finos, sendo assim, optou-se por utilizá-la na condição pré-molhada.



Esta condição consistiu em uma rápida molhagem da areia de britagem antes de ser depositada na betoneira, fazendo com que a água ficasse adsorvida nos grãos.

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica comercialmente conhecido como brita 0 ou pedrisco com dimensão máxima característica de 9,50 mm, módulo de finura igual a 5,75, massa específica e massa unitária da ordem de 2,72g/cm<sup>3</sup> e 1,23g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. O índice de absorção de água foi de 2,17%.

O aditivo utilizado foi um superplastificante, líquido, pronto para o uso e livre de cloretos, recomendado para fabricação de todo tipo de concreto onde se necessita baixa relação água/cimento (*a/c*) e alta fluidez, sendo compatível com todos os tipos de cimento Portland, atendendo os requisitos da norma NBR 11768<sup>(14)</sup> de aditivos para concreto Portland. A dosagem varia de 0,4% a 1,2% sobre a massa de cimento.

A água utilizada na confecção dos corpos de prova foi proveniente da rede de abastecimento público de Erechim/RS.

## 2.2 Método

O concreto para blocos apresenta consistência de terra úmida, e não plástico, como a maioria das aplicações correntes. O concreto seco caracteriza-se por ter uma baixa relação água/materiais secos, grande consistência (*slump* zero) e alta coesão, esta, é em função da correta quantidade de finos em conjunto com os equipamentos de vibração e pressão de adensamento no momento da moldagem<sup>(15)</sup>.

Para a produção do traço utilizou-se uma adaptação do método de dosagem de concreto plástico do IPT/EPUSP no qual admite um abatimento de tronco de cone (*slump test*) igual a zero, característico para blocos de pavimentação<sup>(16)</sup>.

Para verificar a melhor quantidade de água no concreto, ou seja, o ponto ideal, visto que o *slump test* é igual à zero, foi utilizado o Método do Ponto de Pelota (figura 2). O ponto de pelota ocorre quando uma quantia de concreto colocada nas mãos secas adquire consistência para se firmar sem deixar resíduo nas mãos. Caso o concreto se solte nas mãos, é necessário acrescentar água, corrigindo a relação *a/c* <sup>(15)</sup> <sup>(17)</sup>.



Figura 2 – Método do ponto de pelota



O processo que foi empregado para a produção dos pavers é o processo conhecido como prensado. Trata-se do método mais utilizado na confecção de *pavers*, marcado pela produção mecânica das peças, e que proporciona maiores possibilidades de formatos e cores, além de resultar no melhor desempenho estético do produto aplicado. O concreto de consistência seca é adensado sob alta pressão e constante vibração em equipamentos de produção em escala denominados vibroprensa<sup>(18)</sup>. A figura 3 apresenta a vibroprensa manual utilizada na produção dos *pavers*.

Figura 3 – Vibroprensa manual



Após a mistura dos materiais e a água, quando o concreto atingiu o ponto estabelecido (ponto de pelota), a massa de concreto foi depositada em 3 fôrmas de dimensões 25x12,5x6cm cada, para o processo de vibro-prensagem.

O processo de moldagem dos blocos compreendeu primeiramente a vibração das partículas, para que as mesmas se acomodassem no molde, em seguida ocorreu à prensagem, com auxílio do operador, juntamente com a vibração. O tempo de vibração consistiu no preenchimento das fôrmas com o concreto, e a vibro-prensagem levou aproximadamente 20 segundos. Posteriormente, os *pavers* foram depositados sobre placas de madeira.



O tempo de desfôrma foi de 24 horas, depois disso os *pavers* foram colocados na câmara úmida com temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar acima de 95% para o processo de cura, sendo retirados nos tempos de 7 e 28 dias, respectivamente, para realização dos ensaios no estado endurecido.

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância simples (ANOVA), proposto com significância estatística de 95% de confiança, o qual buscou avaliar se o fator de controle causou efeito significativo na variável de resposta.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Inspeção visual

A inspeção visual é utilizada a fim de verificar se as peças confeccionadas apresentam defeitos que possam interferir no desempenho estrutural ou na estética do pavimento<sup>(7)</sup>. Os resultados obtidos na inspeção visual estão representados na figura 4.

Figura 4 – Defeitos encontrados

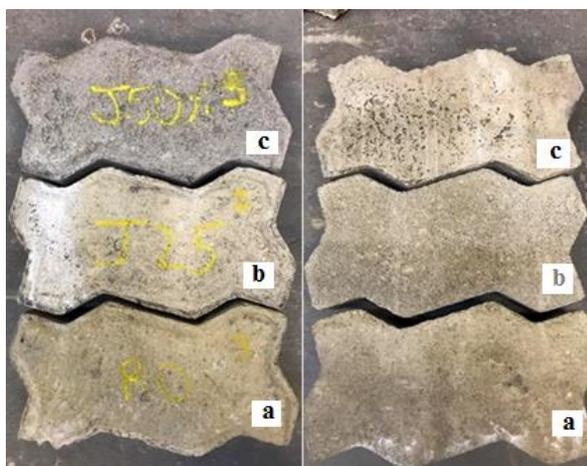
Defeitos/Amostras	Teor de substituição (%)																	
	0						25						50					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Homogeneidade		X	X			X				X								
Arestas irregulares				X									X					
Rebarbas	X		X	X					X		X			X		X		X
Delaminação																		
Descamação																		

Como demonstrado na figura 4, as peças de concreto apresentaram na maioria das amostras defeitos de homogeneidade e presença de rebarbas. Tendo em vista a tipologia da vibroprensa manual utilizada neste trabalho, destaca-se que o molde, o adensamento e a desmoldagem tem influência direta na qualidade do produto por meio do equipamento utilizado<sup>(15)</sup>. O uso de vibroprensas, sobretudo das hidráulicas, poderia permitir maior controle durante a produção e conseqüentemente maior homogeneidade das peças<sup>(19)</sup>.

Percebeu-se em algumas amostras arestas irregulares, indicativas de um baixo teor de umidade na mistura que resultam em problemas de coesão e compactação gerando irregularidades nas peças<sup>(19)</sup>. Notou-se também uma diferença de coloração na combinação com 50% de areia de britagem conforme mostra a figura 5.



Figura 5 – Homogeneidade – a) 0%; b) 25%; c) 50%



Este aspecto pode ter sido influenciado pela maior concentração de areia de britagem, que apresentou uma coloração pontual escura. Os demais defeitos inspecionados, conforme a norma NBR 9781<sup>(7)</sup> não foram encontrados.

### 3.2 Avaliação dimensional

Para a avaliação dimensional realizou-se a medição dos corpos de prova em planos perpendiculares e com auxílio de uma régua, conforme prescreve a NBR 9781<sup>(7)</sup>. Os valores médios obtidos se encontram na tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões médias dos pavers

Teor de substituição (%)	Medida 1 (cm)	Medida 2 (cm)
0	24,90	12,40
25	24,90	12,42
50	24,87	12,30

A NBR 9781<sup>(7)</sup> estabelece que as variações dimensionais devem ser de  $\pm 3$  mm em relação ao tamanho da fôrma. A vibroprensa manual utilizada possuía fôrmas com dimensões de 25x12,5x6cm. Portanto, os valores obtidos não apresentaram variação significativa, estando em conformidade com a norma.



### 3.3 Resistência característica à compressão

Os valores médios da resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias, bem como o desvio padrão, encontram-se na tabela 4.

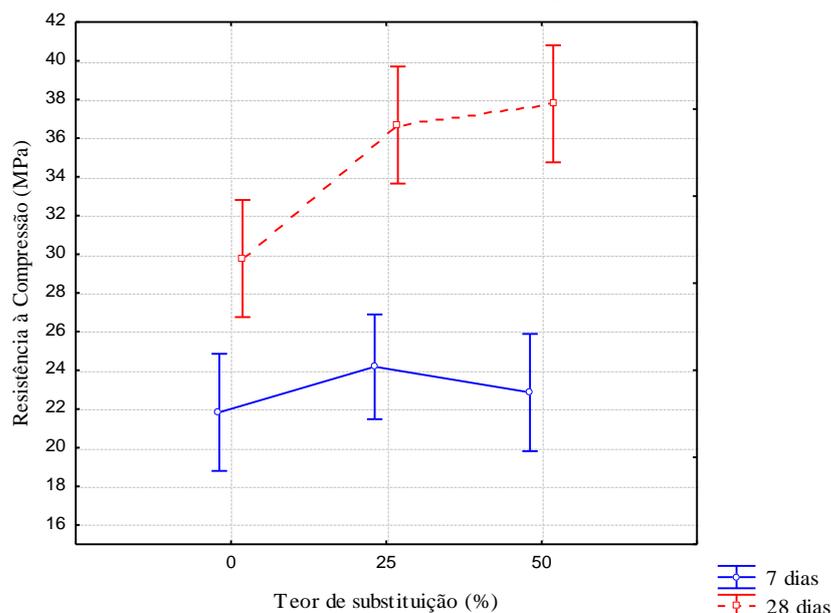
Tabela 4 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias

Teores	Resistência à compressão (Mpa)			
	7 dias	Desvio Padrão	28 dias	Desvio Padrão
% AB				
0 %	21,83	±1,44	29,78	±1,87
25 %	24,18	±2,99	36,68	±4,99
50 %	22,85	±2,37	37,78	±2,23

Analisando os resultados obtidos nas duas idades, percebe-se o aumento de resistência à compressão tanto para o teor de 25% como para o teor 50%, em relação ao teor referência (teor 0%). Aos 7 dias, os acréscimos foram de 10,76% e 4,67% respectivamente. Já aos 28 dias os resultados alcançaram 23,17% para o teor 25% e 26,86% para o teor 50%, se comparados com o referência.

Na figura 6, é demonstrado o efeito combinado da idade com o teor de substituição na resistência à compressão.

Figura 6 – Efeito combinado da idade com o teor de substituição na resistência à compressão



Analisando a figura 6, comprova-se o aumento na resistência à compressão de todos os teores de substituição com a idade. Os acréscimos dos teores 0%, 25% e 50% foram de 36,41%,



51,7% e 65,33%, respectivamente, e se deve ao procedimento de cura utilizado e a baixa relação a/c.

Os agregados que são previamente saturados antes da mistura, absorvem certa quantidade de água, que pode ser considerada como água livre e com isso ocorre o efeito conhecido de “cura interna”, que melhora as propriedades da matriz de cimento, hidratando as partículas de cimento que ainda não foram hidratados. Nesse sentido, a condição de pré-molhagem da areia de britagem contribuiu no processo de cura para o ganho de resistência<sup>(20)</sup>. A cura úmida é ideal para concretos de baixa relação a/c no ganho de resistência, proporcionando grande desenvolvimento ao concreto<sup>(21)</sup>.

Conforme análise dos resultados obtidos pelo método Tukey, observa-se que aos 7 dias o teor 0% se mostrou significativamente igual ao teor com 25% e 50%. Assim, o traço com 50% é viável perante o traço de referência por apresentar maior quantidade de areia de britagem em sua composição. Aos 28 dias, o teor referência foi significativamente diferente tanto para o teor de 25% como para o teor de 50%, pois estes tiveram acréscimos de resistência.

Obteve-se acréscimo no valor da resistência à compressão, com o aumento da proporção da areia de britagem nas misturas, aos 28 dias. Este fato se deve a um aumento gradual da densidade de massa aparente no estado endurecido, motivado pela maior massa específica e maior teor de material pulverulento apresentados pela areia de britagem que leva a obtenção de um produto com compacidade mais elevada<sup>(22)</sup>.

Os teores estudados que não atingiram a resistência estabelecida por norma (35 MPa) mas atingiram um valor superior a 25 MPa, são considerados tecnicamente viáveis para serem utilizados em pavimentos com baixas solicitações de tráfego<sup>(17)</sup>.

### **3.4 Absorção de água**

Os ensaios de absorção de água para as peças de concreto para pavimentação, foram realizados conforme as prescrições da NBR 9781<sup>(7)</sup> e apresentaram os resultados expostos na tabela 5.



Tabela 5 – Absorção de água aos 7 e 28 dias

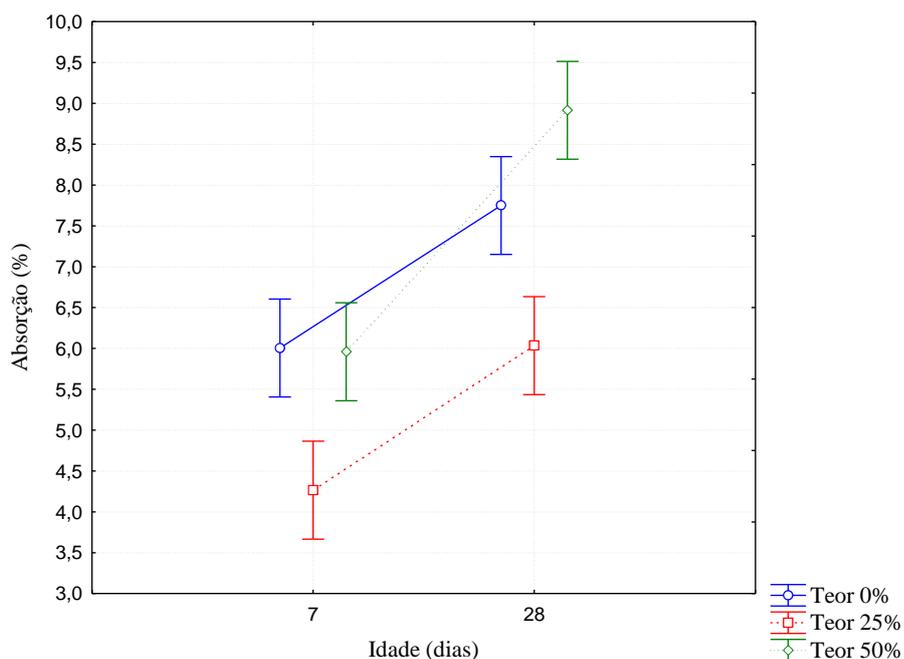
Teores	Absorção de água (%)			
	7 dias	Desvio Padrão	28 dias	Desvio Padrão
% AB				
0 %	6,01	0,08	7,75	0,03
25 %	4,27	0,83	5,69	0,01
50 %	5,96	0,17	8,92	0,02

Analisando os resultados aos 7 dias através da tabela 5, nota-se um decréscimo na absorção de água para as peças com os teores de 25% e 50% respectivamente. Os valores obtidos estão em conformidade com a norma que estabelece um valor máximo de 6% de absorção.

Já os resultados aos 28 dias apresentaram valores de absorção relativamente altos. As peças moldadas com o teor de 25% de substituição tiveram um decréscimo de 26,58% em relação ao teor referência e acréscimo de 15,09% para as peças com teor de 50%. Com isso, apenas o traço com teor de 25% está em conformidade com a NBR 9781,<sup>(7)</sup> enquanto o teor referência e o teor de 50% ultrapassaram o limite estabelecido em 6%.

Por meio do método de variância simples, é possível observar na figura 7, a influência das idades analisadas para os diferentes teores de substituição de areia natural por areia de britagem sobre a absorção de água.

Figura 7 – Efeito combinado da idade com o teor de substituição na absorção de água





Com base na figura 7, percebe-se um aumento no índice de absorção de água conforme o concreto era submetido ao período de cura na câmara úmida. Os acréscimo para os teores de 0%, 25% e 50% foram de 28,95%, 33,25% e 49,66%, respectivamente. Este fato pode ser explicado devido a maior quantidade de finos, sendo que a água pode ter ficado adsorvida ao redor dos grãos, sendo contabilizada como água adsorvida no ensaio<sup>(23)</sup>.

A absorção de água em peças de concreto para pavimento intertravado, está diretamente relacionada ao melhor empacotamento de partículas que pode ser proporcionado pela parcela de finos presente em determinadas areias. Uma microestrutura mais compacta representa um menor volume de vazios a serem ocupados pela água, e conseqüentemente, em menores valores de absorção de água. Com isso, a pouca quantidade de material pulverulento na areia de britagem estudada somado a condição de pré-molhagem também pode ter influenciado nos valores de absorção, visto que o pouco de finos que existia na areia pode ter sido parcialmente reduzida durante a molhagem da areia<sup>(18)</sup>.

Analisando por meio do teste Tukey, pode-se dizer que o teor de 50% não apresentou diferença significativa se comparado ao teor de referência, ou seja, são considerados estatisticamente iguais em ambas as idades. O teor de 25% é significativamente diferente, comparado tanto ao teor de referência, como ao teor de 50% de substituição, apresentando decréscimo no índice de absorção.

#### 4. CONCLUSÕES

Quanto a inspeção visual as peças apresentaram defeitos relacionados ao tipo de equipamento utilizado para a produção dos *pavers*, bem como a umidade insuficiente na mistura, relativa a baixa relação a/c que gerou a presença de rebarbas e arestas irregulares. Além disso, as peças confeccionadas com 50% de substituição não apresentaram aspecto estético satisfatório devido a exist

As variações dimensionais realizadas através da análise visual dimensional das peças, respeitaram o estabelecido pela norma NBR 9781<sup>(7)</sup>. O tamanho correto das peças proporciona um assentamento adequado, garantindo assim seu intertravamento, que é fundamental para o desempenho e durabilidade do pavimento.



Quanto ao comportamento mecânico, ficou evidente que o uso de areia de britagem em substituição parcial pela areia natural, apresentou um bom desempenho na resistência a compressão, com valores acima dos 35Mpa, estabelecidos na NBR 9781<sup>(7)</sup>. nos traços com os teores de 25% e 50% de substituição, aos 28 dias. Do ponto de vista econômico, o teor com 50% de substituição se destaca, visto que foi o traço que atingiu a maior resistência entre as combinações avaliadas e com menor quantidade de areia natural, além de que é estatisticamente diferente do traço referência.

No ensaio de absorção de água, aos 28 dias, os resultados ficaram acima do aceitável pela NBR 9781<sup>(7)</sup> com valores acima de 6%, exceto para o traço com teor de 25% de substituição. A alta absorção se deve, principalmente à porosidade das peças. A condição de pré-molhagem da areia de britagem resultou na eliminação de material fino (mesmo que pouco) presente, permitindo que houvesse um aumento no índice de vazios da mistura, visto que os finos, em certos limites, contribuem com o melhor fechamento dos poros no concreto.

Ainda assim, pode-se confirmar que a areia de britagem é uma boa alternativa à substituição da areia natural na composição de concretos, evitando o descarte inadequado desse material no meio ambiente e contribuindo para seu uso sustentável. De modo geral, cabe salientar, que uma maior quantidade de estudos deve ser feita para se ter um melhor entendimento de suas propriedades e aplicações na construção civil.



## 5. REFERÊNCIAS

1. IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, 2019. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br>> Acesso em: 15 mai. 2019.
2. KITAMURA, S. **Estudo experimental sobre a influência da substituição do agregado miúdo natural por granito triturado, nas propriedades do concreto de cimento Portland.** 2011. 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.
3. SILVA, L. S., DEMETRIO, J. C. C., DEMETRIO, F. J. C. Concreto Sustentável: Substituição da areia natural por pó de brita para confecção de concreto simples. In: **5th International Workshop - Advances in Cleaner Production**, São Paulo, 2015.
4. ONU – Organização das Nações Unidas. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), 2016. Disponível em <<http://web.unep.org/americalatinacaribe/br>> Acesso em 15 mai. 2019.
5. ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. **Areia e Brita.** 73 ed. São Paulo: ANEPAC, 2019.
6. FIORITI, C.F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo.** 218f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. 26f. Rio de Janeiro, 2013.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. 6f. Rio de Janeiro, 2009.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 8f. Rio de Janeiro, 2006.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. 6f. Rio de Janeiro, 2003.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. 3f. Rio de Janeiro, 2001.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificações. 9f. Rio de Janeiro, 2009.
13. LIMA, J. A. R. Aggregate obtained from C&D waste recycling. Proposition of specification for use in concrete. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENRIVONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 6p.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.
15. AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do Município de Juranda/PR.** 2011. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.
16. HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** In: IBRACON – Concreto: Ensino, pesquisa e realizações, 2005. São Paulo: Geraldo Isaia, vol. 1. p. 439-481.



17. HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** 2006. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
18. LEAL, C. E. F. **Peças para pavimento intertravado de concreto: estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado.** 2018. 154f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
19. FERNANDES, I. **Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade.** 7 ed. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2016. 200p.
20. JORDANI, B. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna em concreto com cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2016.
21. BRESOLIN, G. **Influência das técnicas de cura na resistência do concreto e análise da incorporação de cal hidratada na técnica de cura por aspersão periódica de água.** Trabalho de Conclusão de Curso, UNIVATES, Lajeado, 2016.
22. GUACELLI, P. A. G. **Substituição da areia natural por areia de britagem de rochas basálticas para argamassas de revestimento.** 2010. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.
23. CABRAL, K. O. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaise nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, 2007.



## Cinzas pozolânicas produzidas com lixiviação ácida de biomassas

**Mônica Nunes Lemos<sup>(1)</sup>; Kristian Vinco Xavier<sup>(2)</sup>; Charles Prado Ferreira de Lima<sup>(3)</sup>; Guilherme Chagas Cordeiro<sup>(4)</sup>**

(1) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – monica.nlemos@hotmail.com; (2) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – kristianvinco@gmail.com; (3) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – pflcharles@gmail.com; (4) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – gcc@uenf.br

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar a produção e avaliar as características físicas e químicas de cinzas da casca de arroz (CCA), do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e da folha de milho (CFM) com vistas à aplicação como pozolanas de elevada reatividade. As etapas de produção das cinzas consistiram basicamente de coleta e preparação das matérias-primas, tratamento químico por lixiviação com ácido cítrico, queima conjugada (beneficiamento térmico) e moagem ultrafina das cinzas produzidas (beneficiamento mecânico). A elevada pozzolanicidade das cinzas foi confirmada em ensaios atividade pozzolânica (índice de desempenho) e pelas mudanças na cinética de hidratação de pastas cimentícias observadas em ensaio de calorimetria isotérmica.

**Palavras-chave:** Pozolana de biomassa, Moagem ultrafina, Queima conjugada.

## Pozzolanic ashes produced from biomass acid leaching

### ABSTRACT

This study aims to study the production and the physical and chemical characterization of rice husk (CCA), sugar cane bagasse (CBCA), and corn straw (CFM) ashes for using as highly reactive pozzolans. The stages of the ash production basically consisted of raw material collection, chemical treatment by citric acid leaching, conjugated burning (thermal processing) and ultrafine grinding (mechanical processing) of the produced ashes. The high pozzolanicity of the ashes was confirmed in tests pozzolanic activity (performance index) and hydration kinetics of cement pastes by isothermal calorimetry.

**Key-words:** Biomass pozzolan, Ultrafine grinding, Conjugated burning.



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil gera impactos ambientais significativos tais como o alto consumo energético e de recursos naturais, elevada emissão de gases intensificadores de efeito estufa e geração de resíduos. A produção do cimento Portland contribui expressivamente para esse cenário. Esta atividade foi responsável por cerca de 2,6% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil em 2016 <sup>(1)</sup>, com destaque para o CO<sub>2</sub>, que é liberado em grandes quantidades durante a produção do clínquer.

Neste contexto, o uso de resíduos industriais e agroindustriais em substituição parcial do cimento Portland tem sido fundamental para mitigar os impactos causados pela produção do cimento, além de possibilitar o reaproveitamento destes materiais <sup>(2)</sup>. Materiais pozolânicos e fíleres são utilizados como adições em cimentos comerciais em todo mundo. As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, finamente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio proveniente das reações de hidratação do cimento e geram silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos hidratados <sup>(3)</sup>.

Estudos sobre os efeitos de adições pozolânicas mostraram melhorias nas propriedades de produtos cimentícios em relação ao comportamento reológico <sup>(4)</sup>, à durabilidade <sup>(3,5)</sup> e ao desempenho mecânico <sup>(3,6)</sup>. Isso se deve ao aumento da formação de compostos hidratados decorrentes das reações pozolânicas <sup>(3)</sup> e ao efeito de preenchimento da matriz cimentícia proporcionado pelas partículas finas da adição mineral <sup>(7)</sup>. Pozolanas oriundas de resíduos necessitam, em geral, de diferentes processos para otimizar sua reatividade. Nesse aspecto, vale ressaltar o emprego de processos térmicos <sup>(8-10)</sup>, mecânicos <sup>(11)</sup> e químicos <sup>(12)</sup> utilizados na produção de pozolanas. Vayghan *et al.* <sup>(13)</sup> mostraram que tratamentos químicos de resíduos com lixiviação ácida podem potencializar o desempenho de cinzas em sistemas cimentícios pela a eliminação de óxidos contaminantes e aumento na concentração de sílica.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estudar a produção e avaliar as características físicas e químicas de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), da casca de arroz (CCA) e da folha de milho (CFM) com vistas à aplicação como pozolanas de elevada reatividade. As etapas de produção das cinzas consistiram basicamente de coleta e preparação das matérias-primas, tratamento químico por lixiviação com ácido cítrico, queima conjugada (beneficiamento térmico) e moagem ultrafina das cinzas produzidas (beneficiamento mecânico). A escolha dos resíduos se



justifica pela enorme oferta de bagaço, casca de arroz e folhas de milho no Brasil <sup>(14)</sup> e da presença predominante de sílica em sua composição química <sup>(2,3,7,10,15)</sup>.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção das cinzas (CCA, CBCA e CFM) ocorreu a partir de amostras de casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e folha de milho coletadas nos municípios de Mogi das Cruzes-SP, Campos dos Goytacazes-RJ e Castelo-ES, respectivamente. Após a coleta, todas as matérias-primas foram lavadas em água corrente para a eliminação de eventuais impurezas oriundas do ambiente de coleta, seguida de secagem em estufa por 24 h a 100 °C.

Para a produção da CCA e da CFM as matérias-primas foram submetidas à lixiviação (tratamento químico) com uma solução a 10% de ácido cítrico anidro (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>), por 72 h em temperatura ambiente. Em seguida, cada amostra foi lavada continuamente com água deionizada e filtrada com papel filtro qualitativo até a subida do pH para valores próximos a 6 (valor de pH da água deionizada utilizada). Por fim, o material lixiviado foi seco em estufa por 24 h a 100 °C <sup>(16)</sup>.

Após essa etapa, a casca de arroz e a folha de milho lixiviadas foram submetidas a uma queima conjugada, ou seja, uma queima em duas etapas de acordo com os procedimentos sugeridos por Andreão *et al.* <sup>(17)</sup>. Na primeira etapa de queima, os materiais residuais lixiviados foram calcinados em um forno rudimentar adaptado de Sugita <sup>(8)</sup> para a redução da quantidade de matéria orgânica. É importante ressaltar que essa queima objetivou otimizar o consumo energético, uma vez que a energia de combustão é fomentada pelo próprio material. Posteriormente, as duas cinzas geradas na primeira etapa foram requeimadas no forno mufla a 600 °C em ambiente oxidante, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de residência de 3 h <sup>(18)</sup>.

A produção de CBCA consistiu nos mesmos processos apresentados anteriormente, com exceção da etapa de lixiviação com ácido cítrico, que foi realizada entre as duas etapas da queima conjugada. Essa mudança ocorreu em razão do reduzido rendimento de CBCA em comparação com as demais cinzas estudadas. Após o processo de queima, todas as cinzas foram cominuídas em moinho atritor (Union Process) com vistas à obtenção de produtos com granulometrias similares e com tamanho característico  $D_{50}$  em torno de 10 µm <sup>(17)</sup>.

A composição de óxidos das cinzas produzidas (CCA, CBCA e CFM) foi determinada por análise semi-quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (Shimadzu EDX-720). O ensaio de



perda ao fogo foi realizado em concordância com a NBR NM 18 <sup>(19)</sup>. A distribuição do tamanho de partícula das amostras foi determinada por ensaio de granulometria a laser (Malvern Mastersizer 2000). A superfície específica BET foi obtida em ensaio de adsorção de nitrogênio (Micromeritics Tristar II 3020). A composição mineralógica das cinzas foi obtida por difratometria de raios X em difratômetro Rigaku Miniflex 600, operando com radiação de Cu-K $\alpha$ , tensão de 40 kV, corrente de 15 mA, passo de 0,02° e velocidade angular de 10°/min. Os dados foram coletados entre 8° e 70°.

A atividade pozolânica das cinzas foi avaliada pelo índice de desempenho mecânico (ID) <sup>(20)</sup>, que é obtido pela relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de uma argamassa com substituição de 25% em massa do cimento Portland por uma adição mineral e a resistência de uma argamassa de referência. A dosagem das argamassas foi estabelecida para relações água-material cimentício e areia-material cimentício (cimento e cinza) iguais a 0,48 e 3,0, respectivamente. Um cimento CPP classe G <sup>(21)</sup> foi utilizado nessa fase da pesquisa.

Na Tabela 1 são apresentados os teores de superplastificante (éter carboxílico modificado) usados em cada mistura para manutenção da consistência das argamassas na faixa definida em norma. Para cada mistura foram moldados 4 corpos de prova cúbicos de 2,54 cm de aresta, que foram mantidos nos moldes por 24 h em ambiente úmido. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos imersos em solução saturada com cal por 28 dias. O ensaio de compressão axial foi realizado em uma máquina universal de ensaios Shimadzu UHI-500kN, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min.

**Tabela 1 – Teor de superplastificante das argamassas.**

Argamassa	A-REF**	A-CCA	A-CBCA	A-CFM
Teor de SP (%)*	0,065	0,844	0,504	0,546

\* % de sólidos em relação ao material cimentício.

\*\* A-REF – argamassa de referência; A-X argamassa com a cinza X (CCA, CBCA ou CFM).

O estudo da cinética de hidratação em pastas cimentícias foi realizado por meio do ensaio de calorimetria isotérmica. Dessa forma, pastas com 10% e 20% de substituição em massa do cimento Portland por cada tipo de cinza produzida foram confeccionadas, bem como uma pasta de referência, confeccionada sem o uso de adição mineral. Nesse processo foram usados cimento CPP classe G, água deionizada e superplastificante. A dosagem das pastas foi definida a partir de uma relação água-material cimentício igual a 0,4. A Tabela 2 apresenta o teor de superplastificante usado na confecção das pastas. As pastas foram denominadas de P-REF (referência) e P-X-Y, sendo X o tipo de cinza e Y o teor de substituição empregado (% em massa).



**Tabela 2 – Teor de superplastificante das pastas.**

Pasta	P-REF	P-CCA-10	P-CCA-20	P-CBCA-10	P-CBCA-20	P-CFM-10	P-CFM-20
Teor de SP (%) <sup>*</sup>	0,03	0,10	0,21	0,05	0,10	0,07	0,13

\* % de sólidos em relação ao material cimentício.

Todas as pastas foram misturadas seguindo o mesmo procedimento, que consistiu em homogeneização da água deionizada e aditivo superplastificante, seguido de mistura manual com espátula, por 30 s, da parte líquida com o material cimentício. Posteriormente, a mistura foi concluída em misturador Hamilton Beach por 30 s a 260 rpm e por 60 s a 600 rpm. Imediatamente após o final da mistura, amostras de cada mistura foram inseridas no calorímetro isotérmico Calmetrix I-CAL 2000. As pastas foram monitoradas quanto ao perfil de liberação de calor na hidratação por 72 h a  $25 \pm 0,1$  °C.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta a composição de óxidos e os valores de perda ao fogo das diferentes cinzas, que apresentam cerca de 90% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em suas composições. No que diz respeito aos óxidos contaminantes, observou-se baixos teores de  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$  nas três cinzas. A presença excessiva desses compostos seria altamente indesejável, uma vez que eles ocasionam problemas de durabilidade, como por exemplo as reações álcali-agregados <sup>(22)</sup>. A elevada concentração de sílica nas cinzas e os baixos teores de óxidos contaminantes ressaltam a influência da lixiviação ácida no processo de purificação dos materiais estudados. Resultados similares foram obtidos em estudos prévios <sup>(13,16,23)</sup>. Os valores de perda ao fogo apontaram teores de carbono nas cinzas significativamente inferiores ao teor máximo de 6% estabelecido pela NBR 12653 <sup>(24)</sup>. Esse resultado é satisfatório, uma vez que o carbono residual reduz a concentração de sílica e prejudica a reatividade da cinza pozzolânica <sup>(25)</sup>.

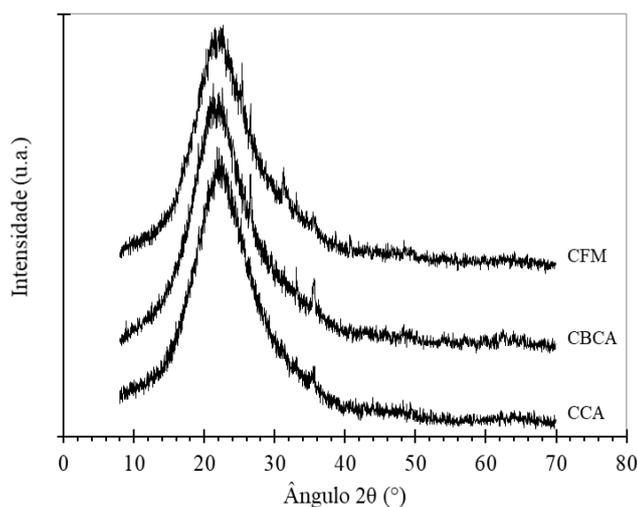
Os difratogramas de raios X das amostras CCA, CBCA e CFM estão indicados na Figura 1 e apontam que as três cinzas não contém fases cristalinas com intensidade significativa. Um típico halo de amorfização formou-se entre os ângulos  $2\theta$  de 20 e 30°, indicando que os procedimentos de queima e moagem mantiveram a sílica presente nas plantas em estado amorfo. Essa característica é fundamental para a produção de pozolanas e coincide com estudos prévios <sup>(12,16,23)</sup>.



Tabela 3 – Composição de óxidos e perda ao fogo das cinzas pozolânicas (%).

Óxido	CCA	CBCA	CFM
SiO <sub>2</sub>	92,3	90,8	89,1
K <sub>2</sub> O	-	2,4	2,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,9	-	-
CaO	0,1	0,9	1,6
SO <sub>3</sub>	1,4	2,3	2,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	1,6	0,3
MnO	-	0,1	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	0,1
Perda ao fogo	3,0	2,0	3,2

Figura 1 - Difratogramas de raios X das amostras de CCA, CBCA e CFM.



A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de CCA, CBCA e CFM, indicando valores de tamanho característico  $D_{50}$  próximos a 10  $\mu\text{m}$  e inferiores ao valor do cimento utilizado (14,9  $\mu\text{m}$ ). Esses resultados evidenciam a eficiência da moagem na homogeneização das partículas, condição necessária para o efeito pozolânico dos materiais, visto que a atividade pozolânica é fortemente ligada ao tamanho e área superficial das partículas <sup>(26)</sup>.

Os valores de índice de desempenho mecânico estão indicados na Tabela 4. Os resultados mostraram que todas as cinzas apresentaram valores de ID superiores a 100%, com destaque para a CFM, que alcançou um índice de 148%. Tal resultado evidencia os efeitos físicos e químicos provocados pela adição pozolânica, associados ao elevado teor de sílica amorfa, reduzida perda ao fogo e alta superfície específica da cinza. O desempenho da CBCA foi superior ao observado em trabalhos que indicaram sua média atividade pozolânica <sup>(17,25)</sup> e ligeiramente superior ao valor observado para a CCA (136%). Isso pode ser atribuído à reduzida contaminação da amostra por quartzo e ao processo de lixiviação com ácido cítrico adotado.



Figura 2 - Distribuição do tamanho de partículas do cimento e das adições minerais.

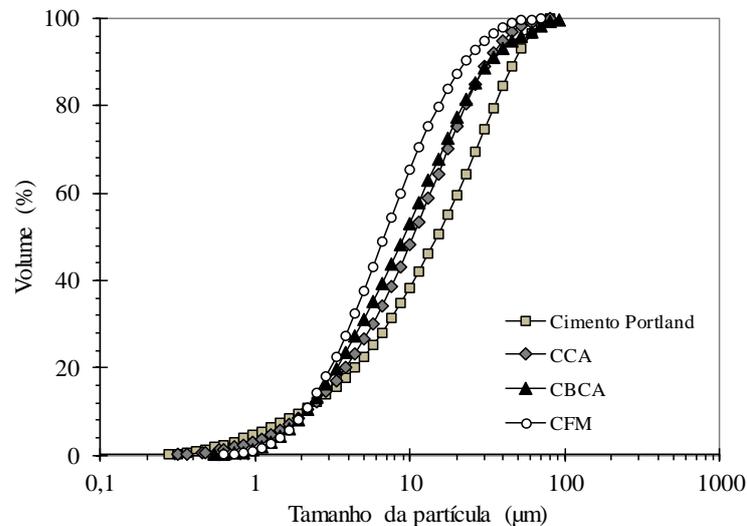


Tabela 4 – Principais parâmetros físicos das cinzas.

Cinza	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Superfície específica BET ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	ID* (%)
CCA	10,5	63.232	136
CBCA	9,2	13.332	107
CFM	6,8	91.630	148

\*parâmetro físico também referido como IAP (índice de atividade pozolânica).

A Figura 3 apresenta as curvas de fluxo de calor de hidratação das pastas com CCA, CBCA, CFM e da pasta de referência. Observou-se, como indicado na Tabela 5, que a adição de CCA promoveu ligeira redução do período de dormência da pasta cimentícia. Tal fenômeno ocorreu em função de efeitos de diluição e, principalmente, nucleação heterogênea associados a essa adição mineral <sup>(26)</sup>. Por outro lado, as pastas com CBCA e CFM apresentaram períodos de dormência mais prolongados que a referência, o que pode ser explicado pela presença de  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$  em ambas as cinzas, como foi previamente observado por Andreão *et al.* <sup>(17)</sup> para amostras de cinzas do bagaço.

A Figura 4 apresenta as curvas de energia acumulada ao longo de 72 horas, que revelam uma aceleração das reações de hidratação promovida pela CCA, sobretudo nas 24 h iniciais. As pastas com 20% de CBCA e CFM apresentaram menor calor acumulado que a referência, evidenciando o efeito de diluição e o retardo na hidratação provocados por ambas as cinzas. O calor máximo acumulado obtido para a P-CBCA-20, por exemplo, foi de 245,7 J/g (Tabela 5), que representou uma queda de cerca de 8% em relação à mistura P-REF.



Figura 3 - Fluxo de calor normalizado, por grama de material cimentício, de pastas com 10 e 20% de CCA, CBCA e CFM e referência.

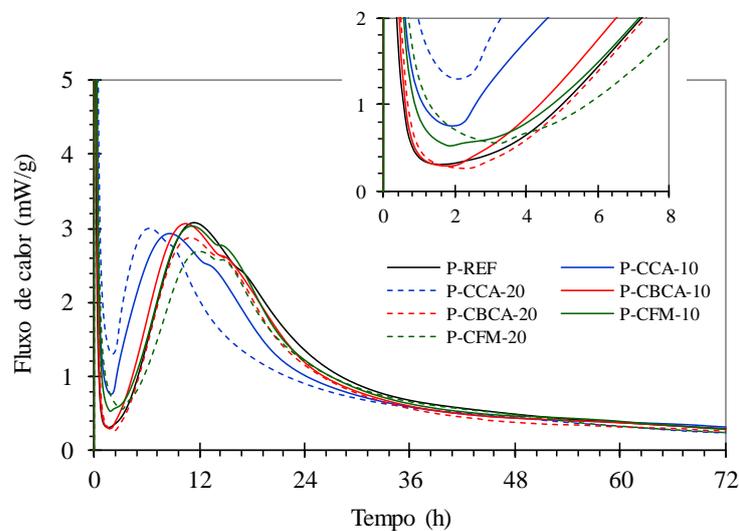
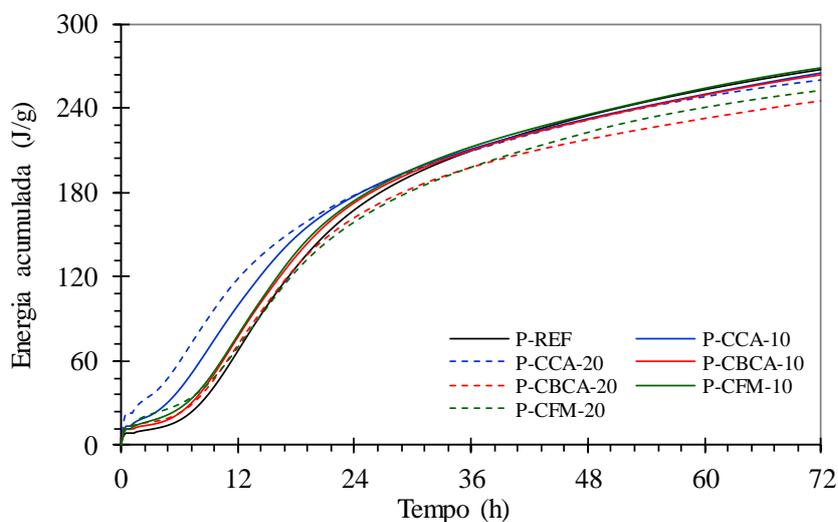


Tabela 5 - Dados do fluxo de calor e de energia acumulada das diferentes misturas.

Pasta	Final do período de dormência (h:min)	Fluxo de calor máximo (mW/g)	Energia acumulada às 72 h (J/g)
P-REF	03:24	3,07	267,3
P-CCA-10%	02:24	2,93	265,9
P-CCA-20%	02:30	3,00	260,5
P-CBCA-10%	03:00	3,06	264,2
P-CBCA-20%	03:30	2,87	245,7
P-CFM-10%	03:40	3,03	268,8
P-CFM-20%	04:50	2,69	252,9

Figura 4 - Curvas de energia acumulada da P-REF e das P-CCA, P-CBCA e P-CFM com teores de substituição de 10 e 20% relativos à massa de material cimentício nas pastas.





## 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que as cinzas produzidas pela confluência de diferentes métodos de beneficiamento apresentaram propriedades típicas de materiais pozolânicos. A composição de óxidos das cinzas mostrou elevados teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em estado amorfo e reduzidos valores de perda ao fogo, resultado de um processo de calcinação eficiente.

A presença predominante de sílica amorfa, em conjunto com elevado valores de superfície específica, possibilitou a classificação das três cinzas como pozolanas na avaliação pelo índice de desempenho, uma vez que todos os resultados foram significativamente superiores ao mínimo descrito em norma (90%).

Além disso, as cinzas em substituição parcial ao cimento Portland (10 e 20% em massa) promoveram pequenas alterações na cinética de hidratação de pastas cimentícias a poucas idades, sobretudo a CBCA e CFM. Desta forma, conclui-se que procedimentos de lixiviação ácida, queima conjugada e moagem de alta energia foram eficientes para a produção de pozolanas com resíduos de importantes biomassas. Ressalta-se, por fim, que o procedimento de lixiviação pode ser realizado com efluentes ácidos dentro das indústrias que utilizam biomassas para geração de energia, como é o caso do vinhoto produzido nas destilarias de etanol, por exemplo.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Além disso, os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), por auxílio financeiro, e ao Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, onde as análises granulométricas foram realizadas.

## 6. REFERÊNCIAS

1. AGÊNCIA FAPESP. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO<sub>2</sub>**. 2016. FAPESP. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/>>. Acesso em: 16 jun. 2019.
2. GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v.29, p. 515-524, 2007.



3. MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanitic and cementitious materials**. 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p., 1996.
4. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 105, p. 487-493, 2008.
5. HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E. Potencial de mitigação do ataque por sulfatos provocado por adições minerais. In: **1º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES**, Foz do Iguaçu, 2014. Anais do 1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Foz do Iguaçu: ALCONPAT, 2014.
6. CORDEIRO, G. C.; PAIVA, O. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. Long-term compressive behavior of concretes with sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, p. 564-573, 2018.
7. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanitic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 410-418, 2008.
8. SUGITA, S. **Method of producing active rice husk ash**. United States Patent US 5329867 A, 1994.
9. SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 441-454, 2001.
10. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcinations temperature on the pozzolanitic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3301-3303, 2009.
11. CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanitic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269-275, 2016.
12. REAL, C.; ALCALÁ, M. D.; CRIADO, J. M. Preparation of silica from rice husks. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 79, p. 2012-2016, 1996.
13. VAYGHAN, A. G.; KHALOO, A. R.; RAJABIPOUR, F. The effects of a hydrochloric acid pre-treatment on the physicochemical properties and pozzolanitic performance of rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 131-140, 2013.
14. IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola - LSPA**. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 jun. 2019.
15. ADESANYA, D. A.; RAHEEM, A. A. Development of corn cob ash blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 347-352, 2009.
16. CORDEIRO, G. C.; VIEIRA, A. P.; LOPES, E. S. Study on the pozzolanitic activity of sugar cane straw ash produced using different pretreatments. **Química Nova**, v. 40, p. 264-269, 2017.
17. ANDREÃO, P. V.; SULEIMAN, A. R.; CORDEIRO, G. C.; NEHDI, M. L. Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. **Green Materials**, v. 7, p. 61-70, 2019.
18. CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 p. Tese (Doutorado) - PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.



19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requerimentos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2006.
22. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 782 p., 2014.
23. KRISHNARAO, R. V.; SUBRAHMANYAM, J.; JAGADISH KUMAR, T. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 21, p. 99, 2001.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
25. CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Enhancement the properties of sugar cane bagasse ash with high carbon content by a controlled re-calcination process. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, p. 1250-1257, 2018.
26. CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p.41-49, 2017.



## ESTUDO DE CINZAS VOLANTES DE ALTA TEMPERATURA E DE LEITO FLUIDIZADO VISANDO A PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A BASE DE CIMENTO

**Carine de Souza Gonçalves<sup>(1)</sup>; Camila Aparecida Abelha Rocha<sup>(2)</sup>; Eduardo de Moraes Rego Fairbairn<sup>(3)</sup>**

(1) UFRJ – carine.goncalves@coc.ufrj.br; (2) UFF – camilaabelha@id.uff.br; (3) UFRJ – eduardo@coc.ufrj.br

### RESUMO

Na produção do concreto, a substituição do cimento por cinzas volantes é uma das formas de reduzir, simultaneamente, o custo de fabricação e as emissões de CO<sub>2</sub>. Diferentes processos de combustão geram cinzas com características distintas. O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos da substituição parcial de cinzas volantes de alta temperatura (HTFA) pouco reativas, por cinzas volantes de leito fluidizado (FBCA), em matrizes a base de cimento. O desempenho dessas cinzas foi comparado em pastas e argamassas por meio de quatro proporções de material cimentício: referência, apenas com cimento Portland CPI; substituição em massa de 43% do cimento por HTFA; e substituição em massa de 9 e 13% da HTFA por FBCA. Pastas foram avaliadas quanto ao calor de hidratação, reologia e retração química, já argamassas, quanto à densidade de massa e resistência mecânica à compressão axial e tração na flexão, após 2, 7, 21 e 28 dias de cura. Ao comparar os resultados, foi possível observar que a retração aumentou e a trabalhabilidade diminuiu nas pastas com FBCA. Do mesmo modo, as maiores resistências foram apresentadas pelas argamassas com FBCA. Sendo assim, é promissora a substituição parcial da HTFA pela FBCA em matrizes a base de cimento.

**Palavras-chave:** cinza volante de alta temperatura, cinza volante de leito fluidizado, cimento

## STUDY OF HIGH TEMPERATURE FLY ASHES AND FLUIDIZED BED ASHES FOR THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE CEMENT BASE MATERIALS

### ABSTRACT

In cement production, replacing cement with fly ash is one way of reducing manufacturing cost and CO<sub>2</sub> emissions simultaneously. Different combustion processes generate ashes with different characteristics. The objective of this work was to verify the effects of the partial replacement of high temperature fly ash (HTFA) with low reactivity, by fluidized bed fly ash (FBCA) on cement-based matrices. The performance of these ashes was compared in pastes and mortars by means of four proportions of cementitious material: reference only with Portland cement CPI; bulk replacement of 43% of the cement by HTFA; and mass replacement of 9 and 13% of HTFA by FBCA. Pastes were evaluated for the heat of hydration, rheology and chemical retraction, and mortar, as for mass density and mechanical resistance to axial compression and flexural tensile strength after 2, 7, 21 and 28 days of cure. When comparing the results, it was possible to observe that the retraction increased, and the workability decreased in the folders with FBCA. Likewise, the greatest strengths were presented by mortars with FBCA. Thus, partial replacement of HTFA by FBCA in cement-based matrices is promising.

**Key-words:** high temperature fly ash, fluidized bed combustion ash, cement



## 1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland, além de ser o principal componente do concreto, é o mais oneroso e o que mais causa impactos ambientais negativos devido ao seu processo produtivo altamente carbono-intensivo. Desse modo, o uso de matérias-primas alternativas na produção do concreto, em substituição ao cimento, vem sendo uma das principais formas de se reduzir, simultaneamente, os custos da fabricação e os impactos ambientais. Nesse âmbito, as cinzas volantes de usinas termelétricas, resíduos do processo de combustão com características pozolânicas, vem sendo amplamente utilizadas com esse propósito.

De um modo geral, as cinzas volantes reduzem a demanda por água, melhoram a trabalhabilidade e aumentam a resistência a longo prazo <sup>(1)</sup>. Entretanto, o tipo cinza volante utilizado influencia o desempenho do concreto <sup>(2)</sup>. Isso ocorre porque, dependendo do material que for usado como combustível e do processo de combustão escolhido, a cinza volante pode apresentar características muito diferentes, que resultam em diferentes interações com o cimento e, conseqüentemente, concretos com propriedades distintas.

As cinzas volantes mais utilizadas pela indústria cimenteira são as de origem da combustão convencional em alta temperatura devido a sua ampla oferta. Contudo, o aumento da demanda por cimento, bem como a necessidade de torná-lo mais sustentável, fez com que as indústrias expandissem seus horizontes para resíduos de outros processos como os da combustão de leito fluidizado. Essa tecnologia tem como vantagem não só redução do teor de enxofre na cinza, sem perdas de eficiência térmica, mas também a capacidade de queimar resíduos e carvões de baixa qualidade, com baixo índice de emissões <sup>(3)</sup>.

Enquanto as cinzas volantes tradicionais, em sua maioria, só apresentam atividade pozolânica, as cinzas fluidizadas, além de apresentarem reatividade maior, pois além da atividade pozolânica, também são capazes de endurecer por simples mistura com água sem quaisquer outros aditivos. No entanto, as cinzas fluidizadas possuem alto teor de cal livre e sulfato de cálcio, o que pode comprometer a durabilidade dos materiais a base de cimento <sup>(4)</sup>. Sendo assim, a substituição parcial da cinza tradicional pela cinza de leito fluidizado pode ser uma alternativa mais eficiente para adições no cimento. Isso porque, o processo de combustão a temperaturas mais baixas gera, não só cinzas mais reativas, como também requer menos combustível e libera menos CO<sub>2</sub> para o meio ambiente <sup>(5)</sup>. Desse modo, se forem combinadas em dosagens ótimas, essas cinzas podem se complementar gerando um produto com bom desempenho e mais sustentável.



Uma vez que a cinza volante com baixo teor de cálcio geralmente possui atividade pozolânica baixa, combiná-la com uma cinza de leito fluidizado é uma forma de se melhorar a reatividade da adição mineral como um todo. Desse modo, o objetivo principal do estudo foi verificar da viabilidade de se substituir, parcialmente, a cinza volante de alta temperatura pela cinza volante de leito fluidizado em matrizes a base de cimento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização dos materiais

O cimento utilizado nos experimentos foi o cimento Portland tipo I (CPI), isto é, sem adições, oriundo do município de Ladce que se localiza no noroeste da Eslováquia. Foram utilizados dois tipos de cinzas volantes: cinza volante de alta temperatura (High Temperature Fly Ash - HTFA) decorrente da combustão de carvão pulverizado na Usina Termoelétrica de Rybnik na Polônia; e cinza volante de leito fluidizado (Fluidized Bed Combustion Ash - FBCA) derivada da combustão do carvão em leito fluidizado na Usina Termoelétrica de Alpiq na República Tcheca. Além dos materiais cimentícios, também foram utilizados água deionizada e agregado miúdo fino (0,063mm a 2mm), ambos de origem Tcheca.

De acordo com a Tabela 1 é possível verificar que a pouca reatividade da HTFA é decorrente do baixo teor de cálcio presente em sua composição e que, em relação a essa cinza, a FBCA apresenta um teor mais alto de CaO e mais baixo de SiO<sub>2</sub>. Além disso, a FBCA apresenta alto teor de sulfatos e CaO livre, que apesar de poderem causar expansão da matriz, tem esse risco minimizado pela substituição parcial, e não integral, da HTFA por essa cinza. Essas características da cinza de leito fluidizado são decorrentes principalmente da baixa temperatura de queima que contribui para grandes quantidades de anidrita e CaO livre, tornando essa cinza um material altamente reativo <sup>(4)</sup>.

Assim, de acordo com os requisitos químicos da NBR 12.653/2014, a HTFA é caracterizada como uma pozolana classe C enquanto que a FBCA apresenta características da classe E. Entretanto, segundo os requisitos físicos dessa norma, a HTFA não pode ser considerada uma pozolana pois seu Índice de Atividade Pozolânica (IAP) é inferior a 90%. De acordo com a Figura 1, é possível verificar que a FBCA não só apresenta uma reatividade maior que a HTFA, como esperado, mas também atente aos critérios da norma em questão.

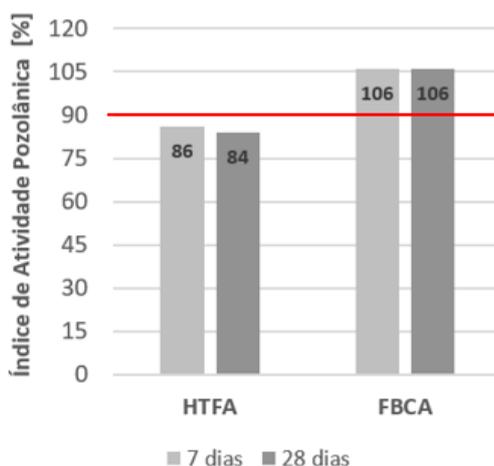


Tabela 1 – Composição química do cimento Portland, cinza volante de alta temperatura (HTFA) e cinza volante de leito fluidizado (FBCA)

Material	CaO [%]	SiO <sub>2</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	MgO [%]	CaO livre	Sulfatos, tipo (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
CPI	61,68	20,41	4,42	2,50	1,4	nd	nd
HTFA	3,91	51,60	24,10	5,44	2,29	nd	nd
FBCA	25,40	34,00	20,10	4,44	0,933	11,1	9,92

nd: não determinado

Figura 1 - Índice de Atividade Pozolânica para amostras com HTFA e FBCA aos 7 e 28 dias determinado de acordo com à NBR 5752/14.



De acordo com a Figura 2 é possível perceber distribuição volumétrica das partículas é semelhante. Entretanto, o diâmetro mediano (D50) dos grãos das cinzas volantes é maior que o do cimento Portland. Além disso, nota-se que a HTFA possui um D50 maior que a FBCA.

Apesar da distribuição das partículas das cinzas ser bastante similar, sua morfologia é bastante distinta, como pode ser observado na Figura 3. Uma vez que a HTFA é obtida através de uma queima a altas temperaturas, a combustão é altamente eficiente, originando um resíduo com formato esférico bem definido e uma superfície com textura lisa Figura 3(a). Já a FBCA, por ter sido queimada a temperaturas mais baixas, é decorrente de uma combustão parcial, e por isso apresenta uma superfície irregular e com textura mais rugosa Figura 3(b). Ademais, também em função da eficiência da combustão, pode ser observado na Figura 3 que a FBCA apresenta tamanho de grãos um pouco maior que a HTFA. Essas características da superfície dos grãos de FBCA também podem ser relacionadas a maior reatividade dessa cinza se comparada com a HTFA.



Além disso, o baixo teor de cálcio da HTFA tende a deixar essa cinza mais cristalina e, conseqüentemente, menos reativa.

Figura 2: Gráfico de distribuição granulométrica de partículas de cimento e cinzas volantes.

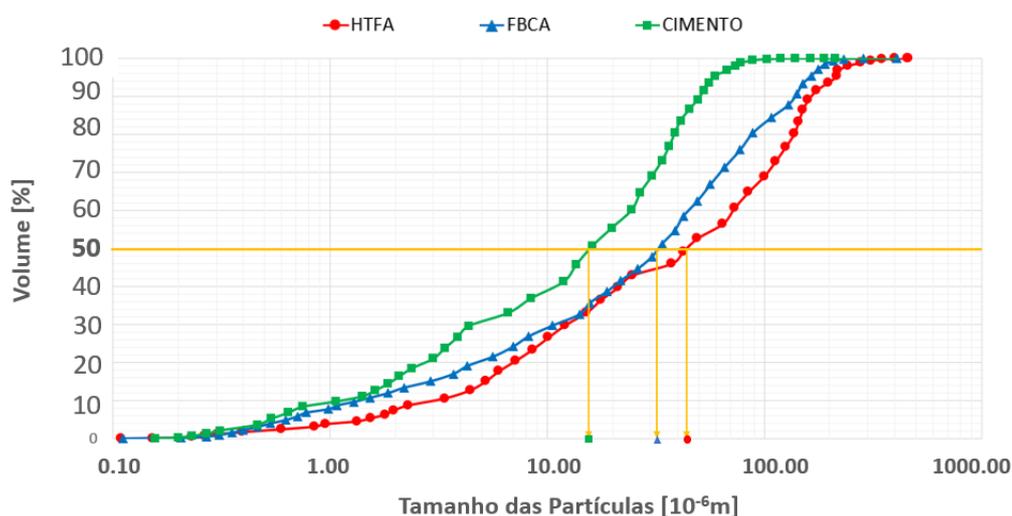
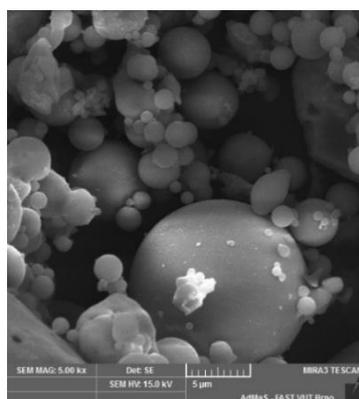
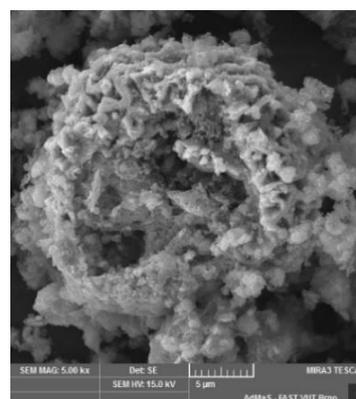


Figura 3 - Morfologia das cinzas volante estudadas (ampliação de 5000x).



(a) HTFA



(b) FBCA

## 2.2. Metodologia dos ensaios em pastas

Quatro pastas de cimento foram confeccionadas com 750g de material cimentante em composições distintas. Duas dessas pastas podem ser consideradas como referência, uma composta apenas por cimento Portland (C) e a outra com substituição em massa de 43% de cimento por HTFA (C+ 43H). A escolha dessa porcentagem se deu por ser um valor típico utilizado na República Tcheca. As outras duas pastas contam com a substituição de 9% (C+(34H +9F)) e 13% (C+(30H+13F)) da HTFA por FBCA, mantendo os 43% de substituição do cimento. Os baixos teores de FBCA utilizados tem como justificativa a expansão da amostra quando a adição dessa cinza supera os 30%, devido ao alto teor de sulfatos e cal livre da presentes. Para evitar essa variação dimensional



e, conseqüentemente, possíveis fissuras, é recomendável que a porcentagem de FBCA na pasta seja inferior a 20% <sup>(6)</sup>.

Uma vez que os diferentes tipos de material cimentante demandam dosagens de água distintas, a relação água/material cimentício (a/mc) foi variada de modo a obter pastas com a mesma trabalhabilidade. A Tabela 2 mostra a relação a/mc adotada para cada amostras em cada ensaio.

Tabela 2 – Relação a/mc das amostras para cada ensaio com pasta de cimento

Amostra	Calor de Hidratação	Reologia (1 <sup>o</sup> ensaio)	Reologia (2 <sup>o</sup> ensaio)	Retração Química
C	0,32	0,42	0,35	0,35
C+(43H)	0,34	0,42	0,36	0,36
C+(34H+9F)	0,37	0,42	0,40	0,40
C+(30H+13F)	0,39	0,42	0,42	0,42

Para medir o calor de hidratação das amostras foi utilizado um calorímetro de isolamento parcial, isto é, semi-adiabático, de acordo com a norma europeia EM 196-9 <sup>(7)</sup>. Os parâmetros de ensaio foram: umidade de 50%, duração de 48 horas e temperatura do ambiente constante de 20°C.

A variação da viscosidade das amostras em função dos teores de cinzas e água foi determinada em um viscosímetro *Viskomat NT*. Durante o ensaio, a rotação foi mantida constante em 100 rpm, o volume da amostra também permaneceu constante e o recipiente foi mantido a uma temperatura de 20°C enquanto a temperatura da pasta foi monitorada.

Para medir a contração de le Chatelier associadas as amostras foi utilizado o *Shrinkage Cone*, que mede a retração de materiais cimentícios fluidos com um feixe de laser, não havendo assim, acoplamento mecânico entre o fluido e o sensor. A mudança de comprimento da amostra foi registrada com uma resolução de 1/10 micron <sup>(8)</sup>.

A análise da morfologia dos materiais e das pastas foi feita por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura com emissão de campo *Tescan Mira 3*. Desse modo, foram geradas imagens com uma ampliação de 5000x para as argamassas C(34H+9F) e C+(30H+13F) após 28 dias de cura.

### 2.3. Metodologia dos ensaios em argamassas

Foram elaboradas quatro argamassas com a mesma composição de material cimentante das pastas. O traço em massa foi de 1:3 (material cimentício: areia), e a relação água cimento, assim como nas pastas, foi variada (C = 0,40; C+(43H) = 0,41; C+(34H+9F) = 0,45 e C+(30H+13F) = 0,47)



para que as argamassas obtivessem a mesma trabalhabilidade. Vale ressaltar que não foram usados aditivos químicos porque, além de serem mais uma variável nas análises, alguns aditivos poderiam influenciar os resultados do ensaio de calorimetria. Por outro lado, a utilização de aditivos redutores de água compatíveis com as cinzas permitiria uma análise mais precisa dos efeitos nas propriedades mecânicas. Para cada dosagem foram produzidos dois corpos de prova (40 x 40 x 160 mm) por idade avaliada (2, 7, 14 e 28 dias), totalizando 8 amostras. O procedimento de produção e cura das argamassas foi similar ao descrito pela norma brasileira NBR7215/1996.

A densidade de massa foi calculada através da razão entre a massa e o volume das amostras produzidas. Desse modo, todas as amostras foram pesadas em balanças digitais de precisão e tiveram suas dimensões aferidas. A média de cada par de amostra gerou os resultados referentes à cada composição nas idades de 2, 7, 14 e 28 dias.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos foi utilizada uma máquina de teste da *RATIO TEC Prüfsysteme GmbH* com célula de carga de 350 N. Foram ensaiados dois corpos de prova para cada uma das composições para cada idade de cura, logo após a determinação da densidade de massa. A amostra foi posicionada horizontalmente sobre dois apoios distantes 300mm e ensaiada a uma velocidade de 0,06kN/s.

Para o ensaio de resistência à compressão foi utilizada uma máquina de teste de compressão da *RATIO TEC Prüfsysteme GmbH* com célula de carga de 100kN. Esse ensaio foi realizado logo após ao teste de resistência a tração na flexão em 3 pontos, uma vez que após a ruptura a amostra se apresenta como duas metades com formato próximo ao de um cubo. Desse modo, cada metade foi ensaiada à compressão, totalizando 4 corpos de prova de cada composição, a uma velocidade de 2,4kN/s.

Como foi adotada uma relação  $a/mc$  variável, para se analisar a influência das cinzas volantes na resistência das amostras foi necessário realizar uma normalização das resistências à compressão. Para isso foi utilizado o ábaco *British Standard Method mix design* <sup>(9)</sup>. Com isso foi possível estimar a resistência à compressão da amostra de referência para cada uma das relações  $a/mc$  das argamassas e posteriormente comparar com as resistências das argamassas com cinza volante. Essa comparação foi realizada apenas para 28 dias de cura.

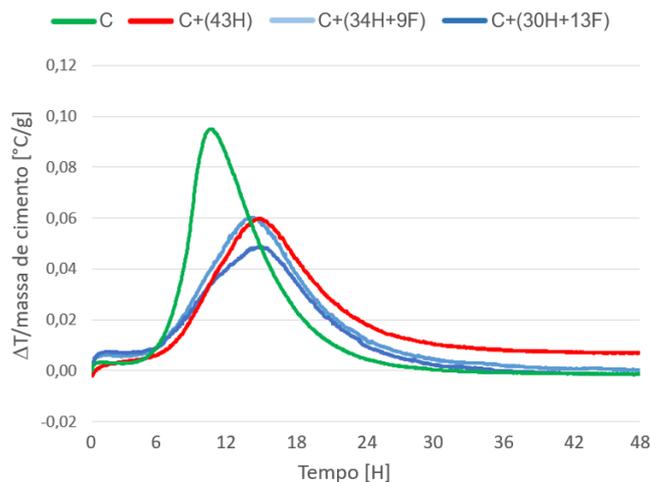
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO



### 3.2. Ensaios em pastas de cimento

Os resultados fornecidos pelo calorímetro semi-adiabático foram processados e a Figura 4 apresenta variação da temperatura (em relação a temperatura inicial) pela massa de cimento de cada amostra até 48 horas de ensaio.

Figura 4 – Variação de temperatura por massa de cimento ao longo do tempo das pastas de cimento estudadas



Apesar da reatividade da FBCA ser maior que a da HTFA, não foi possível observar grandes variações no pico principal para as pastas confeccionadas com essas cinzas. Isso ocorreu porque apenas uma pequena porção da HTFA foi substituída pela por FBCA. Entretanto, foi possível verificar que o pico exotérmico principal, para as amostras com cinzas não só foi retardado em cerca de 4 horas, como também foi, aproximadamente, 58% menor do que o pico da pasta apenas com cimento. Essa redução de calor liberado está associada ao fato de que reação de hidratação do cimento é termoativada, isto é, o calor gerado pela reação é utilizado para potencializar a sua cinética. Uma vez que a termoativação acelera as reações de hidratação, a maior inclinação da curva de calorimetria da pasta de referência, entre 6 e 10 horas, é justificada por esse fenômeno.

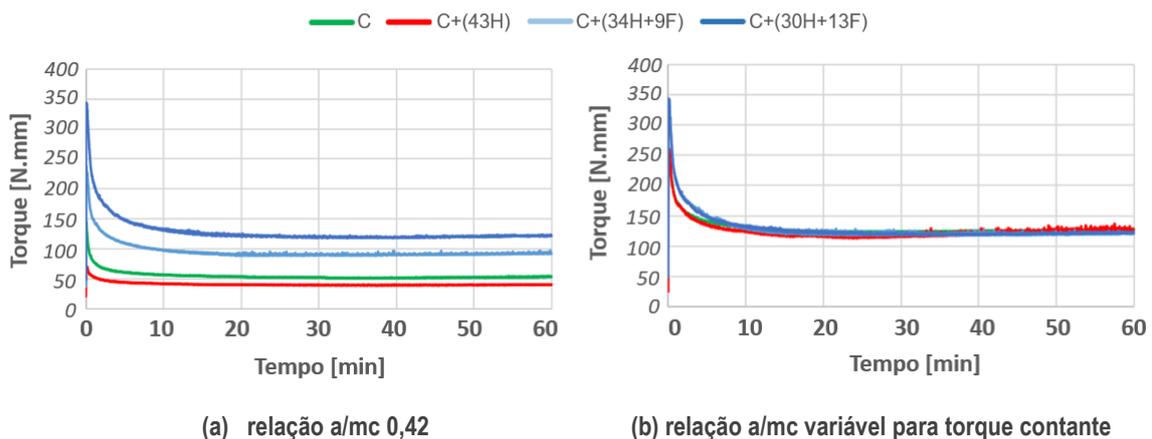
Além disso, vale ressaltar que, na primeira hora do ensaio, as amostras com adição de FBCA apresentaram um pico exotérmico inicial maior que o da pasta com HTFA, chegando a se aproximar com a curva do cimento puro. Essa maior liberação de calor no início da reação se deu, provavelmente, devido à formação de mais etringita pela maior quantidade de sulfatos na FBCA.

Quanto as propriedades reológicas, no primeiro ensaio, onde a relação água/material cimentício foi mantida em 0,42, foi possível observar que a substituição parcial do cimento Portland por HTFA levou a uma leve redução do valor do torque em relação ao cimento puro, caracterizando uma



menor viscosidade dessa amostra, como pode ser observado na Figura 5(a). Entretanto, verificou-se que ao substituir parte da HTFA por FBCA os torques associados a essas amostras foram superiores ao da amostra de cimento puro, caracterizando pastas mais viscosas, ou seja, com menor trabalhabilidade. Além disso, foi possível constatar que, quanto maior a proporção de HTFA na pasta, maior é o torque, e, conseqüentemente, maior é a viscosidade.

Figura 5 – Torque em função do tempo para as diferentes pastas estudadas



Essas variações no aspecto reológico da pasta de cimento estão diretamente relacionadas com os fenômenos de superfície, pois quanto maior a superfície de contato e o imbricamento dos grãos maior é a viscosidade e a coesão associadas. Uma vez que a FBCA apresenta um formato irregular e é mais porosa que a HTFA, a sua superfície específica tende a ser maior, contribuindo assim para valores de viscosidade e coesão maiores. Vale destacar que a pasta com HTFA apresentou viscosidade menor que a pasta contendo apenas cimento, devido a morfologia esférica dessa cinza que favorece a dissipação viscosa do fluido.

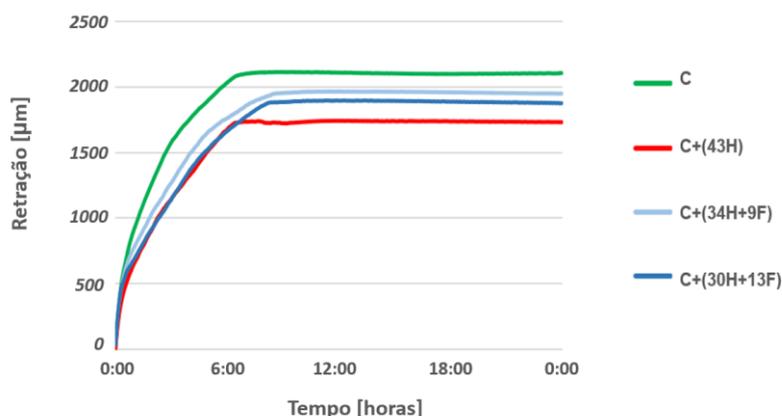
No segundo ensaio (Figura 5(b)), ao invés de manter a relação a/mc constante, manteve como referência o torque da pasta que apresentou maior viscosidade no ensaio anterior, a amostra C+(30H+13F). Sendo assim, para aumentar a viscosidade das amostras, as relações a/mc tiveram que ser reduzidas. A redução foi mais significativa para as amostras de cimento puro e a C+(43H) equivalendo 17% e 14%, respectivamente. Já para a C+(34H+9F) essa variação foi de menos 5%. Uma vez que a redução na relação a/mc, para uma mesma proporção de material cimentante, implica em uma redução do volume de água adicionado na mistura, nota-se que, como esperado, foram necessárias maiores reduções de água nas pastas apenas com cimento e na pasta C+(43H), sendo intermediária a pasta com utilização de 9% de FBCA.

O ensaio da contração de Le Chatelier foi realizado desde instantes após do contato da água com o



cimento até a consolidação do patamar de percolação. Quando o patamar de percolação é formado a contração de Le Chatelier é máxima e a pasta começa a adquirir propriedades de um sólido. Essa transição pode ser visualizada na Figura 6 quando as curvas de retração deixam de crescer e se tornam constantes no tempo. A partir desse momento, a retração é decorrente da sucção de água para a hidratação (retração autógena) e não é detectada pelo instrumento de medida utilizado.

Figura 6 – Contração de Le Chatelier das diferentes pastas estudadas em função do tempo



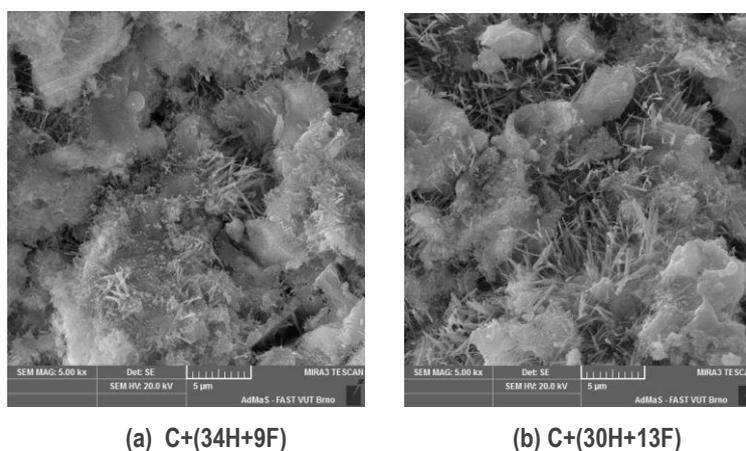
Foi possível observar pela Figura 6 que, enquanto a maior retração química ocorreu para a pasta de cimento sem adições devido a sua maior atividade química, a menor retração foi da amostra com a cinza com menor reatividade, (HTFA). As amostras com teores de FBCA apresentaram valores intermediários de retração, isto porque, parte da HTFA foi substituída por FBCA (cinza com atividade pozolânica) aumentando, assim, a retração dessas amostras. Entretanto, ao contrário do que se esperava para essas amostras, a pasta com menor concentração de FBCA apresentou uma contração maior do que a pasta com mais FBCA. Esse resultado pode estar relacionado a teores mais altos de CaO livre e gesso na amostra com mais FBCA. A presença desses componentes na pasta faz com que haja maior expansão da amostra, reduzindo a contração. Assim, uma possível justificativa para o resultado encontrado é que ao reduzir os teores de HTFA e, conseqüentemente, aumentar os de FBCA, ocorre uma certa compensação entre a expansão e a retração da pasta.

Além disso, os resultados do ensaio de retração química mostraram que as amostras com cinzas volantes do tipo FBCA demoraram mais para se solidificar e iniciar a retração autógena. Esse atraso, em relação as outras amostras, retarda o tempo de pega das pastas com esses aditivos. Sendo o tempo para atingir o patamar de percolação diretamente proporcional ao teor de gesso na amostra, pode-se dizer que a FBCA possui maior teor de gesso em sua composição, aumentando assim, o tempo de trabalhabilidade das pastas com essa cinza.



A microestrutura da pasta, obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura em amostras fraturadas, na idade de 28 dias de cura, foi realizada apenas para as amostras com FBCA com o intuito de identificar as alterações na microestrutura para diferentes teores dessa cinza. Comparando-se as Figuras 7(a) e 7(b) foi possível verificar que um maior teor de FBCA na pasta leva a uma maior produção de etringita, visualizada como as pequenas agulhas presentes nas imagens. Isso ocorre devido ao aumento de  $\text{CaSO}_4$  disponível na pasta que ao reagir com a água e os aluminatos presentes no cimento forma esse componente.

Figura 7 – Microestrutura da pasta de cimento com FBCA após 28 dias de cura (ampliação de 5000x).



### 3.3. Ensaios em argamassas

A substituição do cimento Portland por cinzas volantes, sejam elas HTFA ou FBCA, não proporcionou grandes variações na densidade de massa das argamassas de cimento ao longo do tempo (Figura 8). Entretanto, foi possível observar que houve uma ligeira redução na densidade de massa com a substituição do cimento por cinzas volantes. Essa variação na densidade mássica das amostras pode estar associada tanto ao aumento da relação  $a/mc$  quanto à menor massa específica das cinzas em relação ao cimento. Enquanto a massa específica do cimento Portland CPI é cerca de  $3,11 \text{ g/cm}^3$  e da HTFA varia entre  $1,90$  e  $2,20 \text{ g/cm}^3$  <sup>(10)</sup> e a massa específica da FBCA fica entorno de  $2,28 \text{ g/cm}^3$  <sup>(11)</sup>. Apesar da FBCA ser mais densa que a HTFA, elas podem apresentar valores muito próximos em determinadas situações. Entretanto, em qualquer circunstância, ambas as cinzas apresentam uma massa específica consideravelmente mais baixa que a do cimento.

Quando as resistências experimentais das argamassas são comparadas (Figura 9), é possível perceber que a adição de cinzas volantes reduziu consideravelmente as propriedades mecânicas das amostras, chegando a uma perda de aproximadamente 45% no pior dos casos, não entanto não houve grandes variações entre as amostras com cinzas.



Figura 8 – Densidade de Massa Aparente das Argamassas aos 2, 7, 14 e 28 dias.

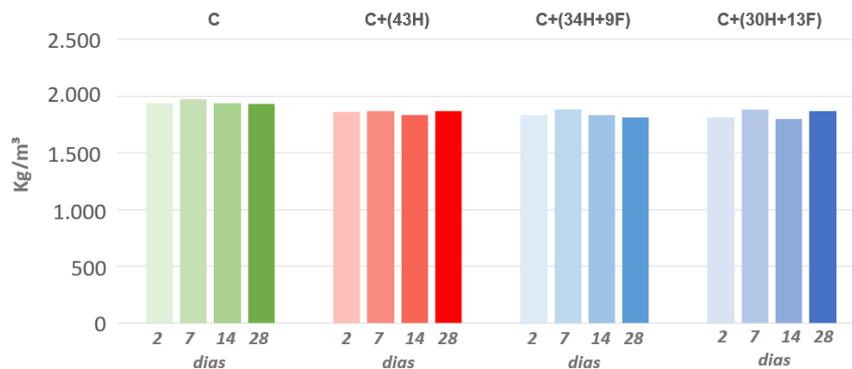
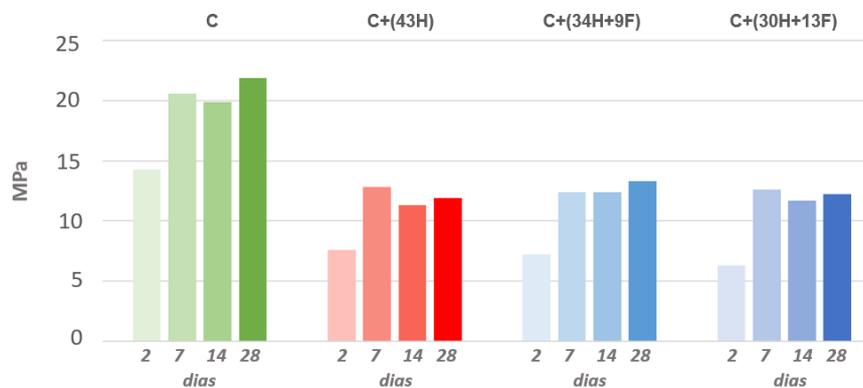


Figura 9 – Resistência à Compressão Axial aos 2, 7, 14 e 28 dias.



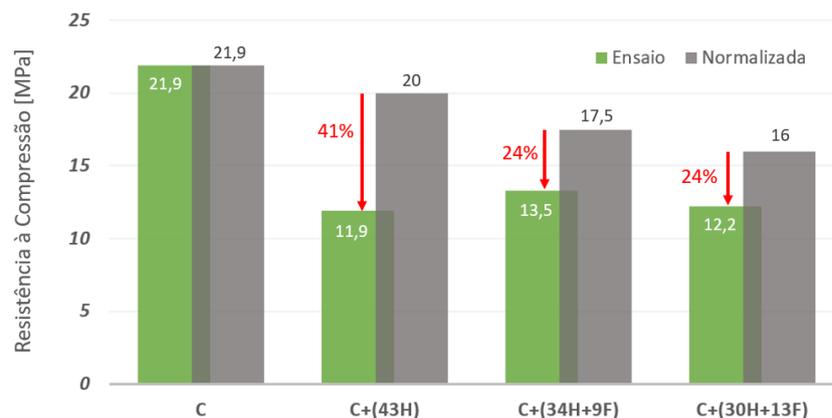
Contudo, como explicitado anteriormente, esses resultados são decorrentes da combinação dos efeitos de substituição do cimento por cinzas volantes e da variação da relação a/mc e, portanto, não representam uma base comparativa adequada para se avaliar a influência das cinzas nas amostras. Sendo assim, a comparação das resistências experimentais com suas respectivas resistências normalizadas, estimadas para mesmas relações a/mc, são apresentadas na Figura 10.

Foi possível observar que mesmo em relação as amostras normalizadas, em todos os casos, houve uma perda de resistência à compressão ao se adicionar cinzas na mistura. É interessante notar que, para o caso da amostra C+(43H) a resistência foi reduzida em 41%, porcentagem essa quase equivalente ao teor de substituição de cimento por essa cinza (43%). Tal fato pode ser justificado pela HTFA não ser uma pozolana. Uma vez que a FBCA apresenta, tanto uma maior atividade pozolânica, como também um teor de cálcio mais elevado, a substituição parcial da HTFA por FBCA proporcionou uma menor perda de resistência das argamassas. Desse modo, a adição de FBCA à mistura melhorou a resistência das argamassas em relação à C+(43H). Além disso, foi possível verificar que mesmo como teores distintos de FBCA, as amostras com adição dessa cinza apresentaram 24% de perda de resistência em relação às amostras normalizadas. Sendo assim, a



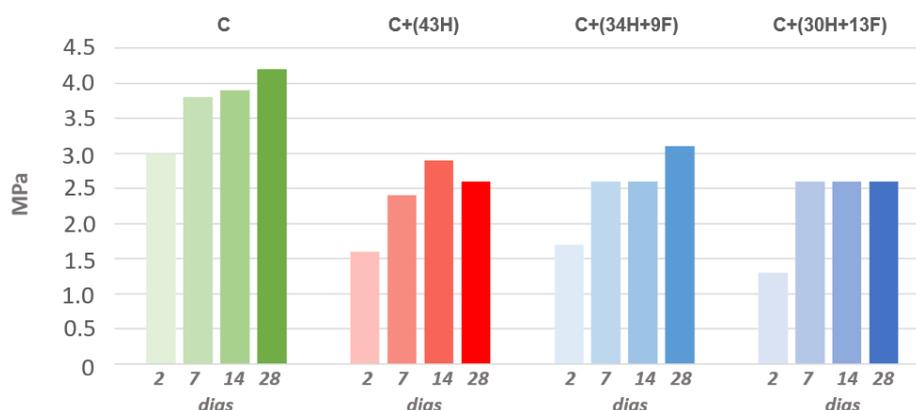
argamassa com 13% de substituição de HTFA por FBCA foi a que apresentou melhor desempenho, isso porque, mesmo com maior teor de FBCA sua resistência a compressão quase não sofreu alterações em relação à da amostra com menor porcentagem dessa cinza.

Figura 10 – Comparação entre a resistência à compressão das argamassas com cinzas volantes e a argamassa de referência com a relação a/c normalizada.



O ensaio de resistência à tração na flexão mostrou que, assim como o ensaio de resistência à compressão, a substituição parcial de cimento Portland por cinzas volantes promoveu uma significativa redução da resistência mecânica da argamassa. Contudo, ao observar a Figura 11, é possível verificar uma leve variação da resistência aos 28 dias, entre as amostras com cinza. Dentre essas amostras, a argamassa com menor substituição parcial de HTFA por FBCA foi a que apresentou melhores resultados.

Figura 11 – Resistência à Tração das argamassas estudadas aos 2, 7, 14 e 28 dias.



Tendo em vista que, em estado endurecido, as argamassas se tornam extremamente rígidas e frágeis, a resistência à tração dessas amostras é significativamente menor que à resistência a compressão. Assim, ao se se fazer a relação resistência à tração na flexão e resistência à



compressão, foi possível observar que para todas as idades a essa relação foi de cerca de 20%, estando de acordo com a literatura <sup>(12)</sup>.

Mesmo sendo possível dizer que a FBCA, quando utilizada em conjunto com a HTFA, pode atuar na melhoria das propriedades mecânicas da argamassa com aditivos minerais, ainda é necessário avaliar os aspectos de durabilidade. Isto porque, a presença de íons sulfato nas cinzas volantes do tipo FBCA promovem a formação de etringita, elemento morfológico que altera as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios <sup>(13)</sup>. Além disso, a presença de cal livre pode causar expansão excessiva do material, o que pode comprometer a sua durabilidade.

#### **4. CONCLUSÃO**

A substituição parcial de HTFA por FBCA apresentou resultados muito promissores no que diz respeito a melhorar a reatividade do aditivo mineral para aplicação em materiais a base de cimento:

- Além de possuir atividade pozolânica, a FBCA também apresentou maior teor de CaO e sulfatos e uma superfície mais irregular e rugosa, quando comparada à HTFA.
- As pastas com adição de FBCA apresentaram maior viscosidade, maior retração química e também maior tempo para atingir o patamar de percolação.
- Apesar da substituição parcial da HTFA por FBCA não ter gerado grandes alterações na resistência à tração das amostras, a adição de FBCA melhorou consideravelmente o desempenho das argamassas no que diz respeito à resistência à compressão.

Assim, apesar da adição de FBCA ter demonstrado potencial como substituta parcial da HTFA, são necessários ensaios adicionais para avaliação da durabilidade da matriz cimentícia assim obtida.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Ao INCBAC, Instituto Tcheco-Brasileiro de Cooperação Acadêmica, que possibilitou o estreitamento das relações de pesquisa entre a Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ e a Universidade Tecnológica de Brno – VUT. Ao AdMAS Center, Centro de Pesquisa em Materiais e Estruturas Avançadas por disponibilizar os equipamentos necessários para as análises. À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de pós-graduação, concedida à primeira autora e pelo apoio à pesquisa Código de Financiamento 001.



## 6. REFERÊNCIAS

1. WORLD BUSINESS COUNCIL ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT, **Concrete Recycling - A Contribution to Sustainability**, Draft version, 2008
2. KHALEEL, O.; RAZAK H. **The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar**. Constr Build Mater; 36:20–6. 2012
3. ANEEL. Atlas de Energia Elétrica 2ª Edição. Capítulo 8: **Carvão mineral**. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf) Acesso: 20/09/2018.
4. ŠILER, P.; BAYER, P.; SEHNAL, T.; KOLARŮVA, I.; OPRAVIL, T.; ŠOUKAL, F. **Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement**. Construction and Building Materials 78, p.181–p.188. 2015
5. GONÇALVES, C. S. **Estudo de cinzas volantes de alta temperatura e de leito fluidizado visando a produção de materiais sustentáveis a base de cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
6. WU, T.; CHI, M.; HUANG, R. **Characteristics of CFBC fly ash and properties of cement-based composites with CFBC fly ash and coal-fired fly ash**. Construction and Building Materials 66, p.172–p.180, 2014.
7. NORMA EUROPEIA. **EN 196-9** - Métodos de ensaio de cimentos Parte 9: Calor de hidratação Método semi-adiabático. 2010.
8. SCHLEIBINGER, **Schleibinger Testing System: Shrinkage-Cone**. Disponível em: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage:Shrinkage-Cone>. Acesso em: 28/06/2018
9. ELTAF, MOHAMMAD. **Concrete Mixed Design Method (BS Method) Concrete Mix Design procedure**. Disponível em: [https://www.academia.edu/28425556/Concrete\\_Mixed\\_Design\\_Method\\_BS\\_Method\\_Concrete\\_Mix\\_Design\\_procedure](https://www.academia.edu/28425556/Concrete_Mixed_Design_Method_BS_Method_Concrete_Mix_Design_procedure). Acesso em: 23/09/2018
10. SILVA, N. I. Warpechowski da et al. **Characterization of fly ash for ceramic use**. Cerâmica [online]. 1999, vol.45, n.296, pp.184-187. ISSN 0366-6913.
11. NOGUEIRA, L. P. P., **Tecnologias de Baixo Carbono Aplicáveis aos Setores Chave do Brasil – Setor Industrial**. Disponível em: [http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes\\_mitigacao/paginas/tecnologias\\_bc.html](http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes_mitigacao/paginas/tecnologias_bc.html). Acesso em: 02/02/2018
12. FARIAS, L. A.; LOPES, A. N. M.; STIVAL, M. L.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M. **Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf>. Acesso: 23/09/2018.
13. HANISKOVÁ, D.; BARTONÍKOVÁ, E.; KOPLÍK, J.; OPRAVIL, T. **The ash from fluidized bed combustion as a donor of sulfates to the Portland clinker**. Procedia Engineering 151 p.394 – p.401. International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016.

# MAPEAMENTO DA CADEIA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM FORTALEZA

**DENISE LEAL (1); VANESSA CAMPOS(1)**  
**(1) Universidade Federal do Ceará**

## **RESUMO**

A construção civil figura entre as principais causadoras de impactos ambientais, não somente em virtude do consumo de recursos naturais, como também pela disposição indiscriminada dos Resíduos de Construção Civil (RCC). Dessa forma, esse estudo buscou mapear o fluxo de processos do RCC desde a geração até a reinserção no mercado ou disposição final. A metodologia da pesquisa se pautou na realização de entrevistas semiestruturadas com representantes do setor público e privado do processo de gerenciamento de RCC. A pesquisa contribuiu para a caracterização das atividades individuais e coletivas de empresas locais envolvidas na logística reversa do RCC e dos intervenientes do processo, além da listagem dos seus principais entraves. Conclui-se que existe a necessidade de maior conscientização dos *stakeholders* (principalmente as construtoras), desburocratização para implantação de usinas de reciclagem, desenvolvimento de técnicas para tratamento de outros materiais como o gesso e a madeira, incentivos para os produtores e compradores de produtos reciclados, maior fiscalização da triagem, transporte e destinação final do RCC. O estudo da logística reversa do RCC se faz necessário para a criação de novos planos de ação, políticas de incentivos, leis e aplicação de sanções que permitam o avanço da atuação sustentável.

Palavras-chave: Gerenciamento do RCC. Logística Reversa. Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Civil construction is one of the main causes of environmental impacts, not only due to the consumption of natural resources, but also due to the indiscriminate disposal of Construction and Demolition Waste (CDW). Thus, this study sought to map the flow of CDW processes from generation to reinsertion in the market or final disposal. The research methodology was based on semi-structured interviews with public and private sector representatives of the CDW management process. The research contributed to the characterization of the individual and collective activities of local companies involved in the reverse logistics of the CDW and of the stakeholders of the process, in addition to listing its main obstacles. It is concluded that there is a need for greater awareness of stakeholders (mainly construction companies), reduction of bureaucracy for the implementation of recycling plants, development of techniques to treat other materials such as gypsum and wood, incentives for producers and purchasers of recycled products, greater supervision of the sorting, transportation and final destination of the CDW. The study of CDW reverse logistics is necessary for the creation of new action plans, incentive policies, laws and application of sanctions that allow the advance of sustainable performance.

Keywords: CDW Management. Reverse logistic. Sustainability.

## **1 INTRODUCTION**

Currently, the Construction Industry is among the main causes of environmental impacts, not only due to the consumption of natural resources in its production chain, but also due to the indiscriminate disposal of construction and demolition wastes (CDW) (BOHNENBERGER et al., 2018). The CDW not only represents the largest share of solid waste existing in urban areas (CHILESHE et al, 2016) but also makes construction industry the largest contributor to landfill growth (MANOWONG, 2012).

As a result, there is a growing interest in sustainable issues, where supply chains are complex in structure and number of participants (PERO et al, 2017). Increasing pressure to improve quality, productivity, efficiency, effectiveness and sustainable development has guided the new behavior of these companies (SAIEG et al, 2018). Therefore, it is crucial the study of the reverse distribution channels, also known as reverse logistics, which deal with actions ranging from the reduction of raw materials used to the correct destination of products, materials and packaging (PEREIRA et al, 2012).

In this context, this research aims to propose improvements to the CDW reverse logistics process through the analysis of the waste generation chain in the city of Fortaleza, Ceará, under environmental, logistics, political and economic perspectives. It is important to emphasize that this study does not focus on the chemical analysis of materials, their reactions or technological innovations. Nor is it intended to investigate the details of the material life cycle. Despite its environmental, financial and technical characteristics, its approach is focused on aspects of reverse logistics, through the study of several stakeholders in the Metropolitan Region of Fortaleza.

## **2 SUSTAINABILITY IN CONSTRUCTION INDUSTRY**

Over the last decades, it has been noted that economic and production systems cannot be separated from environmental aspects. Increased awareness about sustainability has become a priority in the design and operation of supply chains (SUNDARAKANI et al, 2010). Green supply chain management practices, such as reverse logistics, ensure that environmental and ecological objectives are aligned with the chain's operational objectives (NASIR et al, 2017).

Considering that the construction industry is able to absorb almost all its residues (BOHNENBERGER et al., 2018), the Resolution of the National Environmental Council (CONAMA) No. 307 was implemented with the purpose of facilitating the reuse of waste through the use of a classification according to the CDW reuse or recycling capacity. This resolution was further supported by the approval of the Solid Waste National Policy (SWNP) (ABRECON, 2015), which establishes guidelines for the integrated management of solid waste to generators, public authorities and economic instruments (MIRANDA et al., 2016).

CDW management is possible only through the detailing of information such as the composition and quantification of the waste generated (BRASIL, 2010a). Regarding the composition, Mália et al. (2013), Contreras et al. (2016) and Lockrey et al. (2016) point out that concretes, mortars, soil, plaster, bricks, and wood are the main building rubble components generated in the world. In the Brazilian context, Oliveira et al. (2011) and Kazmierczak et al. (2006) observed that concrete, mortar, ceramics, rocks and soils constitute the main constituents of CDW. According to Cabral (2007), such information is compatible with the Brazilian constructive culture, which concentrates its greatest losses in the concreting, masonry, plaster / plaster and coating phases.

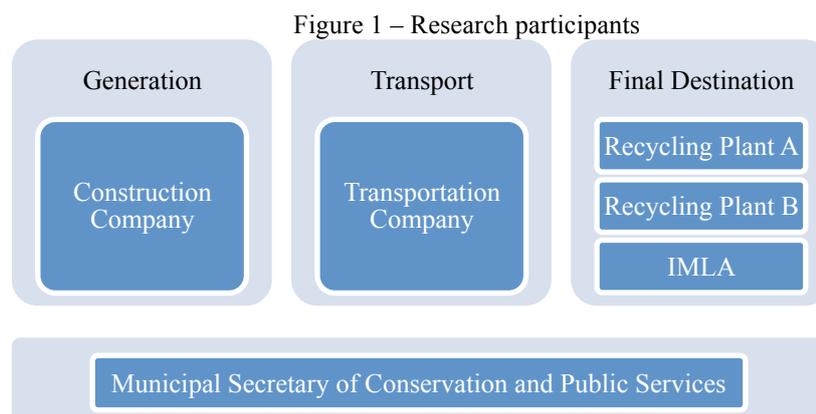
With respect to the waste reuse capacity, there are several possibilities of using CDW components as filler, sub-base of highways, insulation products, among others (COELHO; DE BRITO, 2013). Recycled aggregates, for example, can be used in infrastructure works or landfills, and are sold mainly to public agencies, individuals and construction companies (ABRECON, 2015). Regarding the plants responsible for recycling, the decision about the

type of waste treatment depends on the ease of commercialization of the product generated, as well as the operating costs involved, such as energy, maintenance, cost of rejected materials, transportation (FORTALEZA, 2015).

In accordance with studies carried out by ABRECON (2015), the main causes of the difficulty in the sale of recycled products are the lack of legislation to encourage consumption, a high tax burden, a lack of knowledge by the market, a low waste quality and a lack of commercial access by the recycling company. As a result, most of the CDW is still sent to landfills, reused or cremated precariously (NAGALLI, 2014).

### 3 METHODOLOGY

The research in question focuses on the analysis of the individual and collective activities of the CDW 's reverse logistics in the city of Fortaleza – Ceará, aiming to describe all phases and members from generation to reuse and reinsertion of the waste into the construction industry. According to Figure 1, public and private sector representatives from the CDW management process were interviewed. The choice of the research participants was based on the need to know at least one representative from each group that is part of the reverse productive chain, with the purpose of extracting information about their role, responsibilities, obstacles and interaction with other stakeholders. To do so, the methodology involved a construction company, two recycling plants, an inert material landfill area (IMLA), a transportation company and the Municipal Secretary of Conservation and Public Services (MSCPS).



Fonte: Author (2019)

The stakeholder research was conducted through the application of semi-structured interviews, composed by legal questions (eg.: accreditation, licensing, compliance with environmental norms, penalties), logistics (eg.: disposal, transportation, waste segregation, online collection operation) and financial (eg.: recyclable products operation, treatment and sale costs). The data, both quantitative and qualitative, were treated and concatenated, giving rise to information such as the characterization of each participating company, the main CDW components generated in Fortaleza, the description of the entire reverse process, as well as the main difficulties of each participant .

### 4 RESULTS AND DISCUSSION

This chapter has been divided into three sections in order to better organize the results and comments, as it follows: Characterization of the CDW production chain actors of Fortaleza; Steps for CDW reverse logistics; Obstacles to the progress of waste management in the city of Fortaleza.

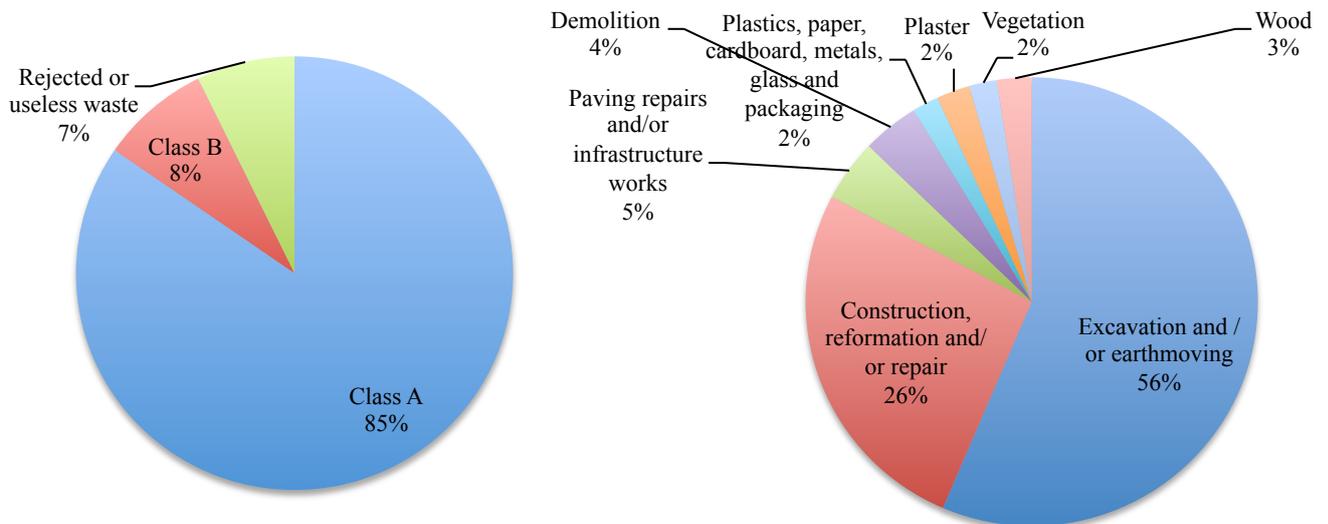
#### 4.1 Characterization of the CDW production chain actors of Fortaleza

The construction productive chain consists of basically three actors: generators, conveyor and waste disposal area. It is important to emphasize that, although each actor performs his role individually, a shared responsibility related to the product life cycle should predominate.

##### 4.1.1 Generators

The waste generators, in this case represented by the construction company, are firms responsible for activities or businesses that generate CDW. Its role was described in the interviews as essential for the achievement of a satisfactory sustainable standard through the disposal of waste at licensed sites, in addition to prioritization for non-generation of waste, followed by reduction, reuse, recycling and final disposal. According to the responsible for the Integrated Management System of the construction company investigated, the Civil Construction Waste Management Plan (CCWMP), required by the Law No. 12.305 (BRASIL, 2010a), is the main step taken by the company to properly manage the CDW. Through this plan, many actions that will guide the management of waste throughout the execution of the work are defined, such as: training focusing on issues such as selective collection, environmental awareness, rational consumption of water and energy; practice of selective collection; creation of a ceramic blocks cutting center; pagination of ceramic tiles; use of remaining of concrete, among others.

Figure 2 – Class and composition percentage of reusable waste (classes A and B) of Fortaleza 2016 - 2018



Fonte: Author (2019).

According to data provided by the Fortaleza City Council (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2019), the CDW average volume generated monthly in the city has been relatively stable in the last three years, with volumes of 81,400 t, 69,265 t and 80,776 t CDW in 2016, 2017 and 2018, respectively. Regarding the percentage of waste generated by class between these years (Figure 2), the same data suggest that of all the CDW produced in Fortaleza, 85% correspond to class A materials and 8% correspond to class B materials. The percentage of class C and D waste is negligible, causing the remaining 7% of CDW to be represented by rejected and useless waste. Considering only the reusable residues (classes A and B), 56% of its composition corresponds to sandy materials resulting from the preparation and excavation of

land; 26% of ceramic components, mortar and concrete; 4% of demolition materials; 5% of materials generated in infrastructure repairs (asphalt, curb, parallelepiped); among others. This information corroborates with researches related to the composition of CDW in the country (CABRAL, 2007) previously presented and reveals a pattern for buildings based mainly on the use of concrete structures and ceramic components.

#### *4.1.2 Conveyors*

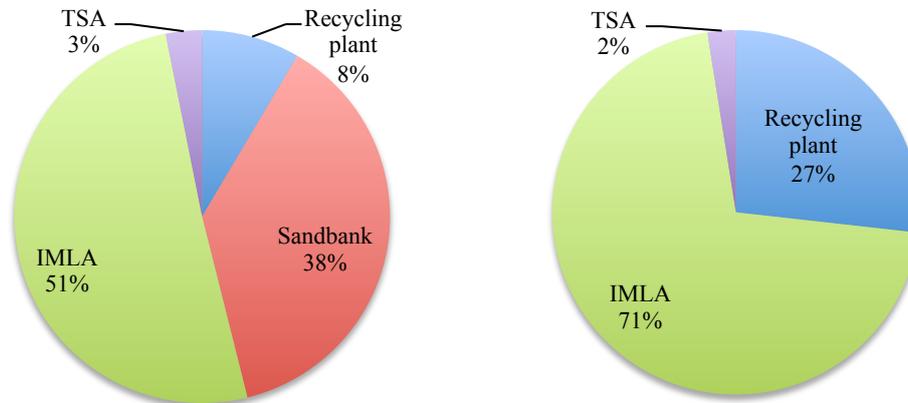
The conveyors correspond to the companies responsible for collecting and transporting the waste between the builders and the destination areas. Due to the need for accreditation with the city hall - which entails various legal and operational requirements - in Fortaleza there are only 19 companies registered in the city hall website for the collection of CDW in general (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2018b). Of this total, ten companies are responsible for the collection of vegetable waste and construction with the supply of stationary buckets, that is, they are destined to the collection of solid waste from pruning and cutting of trees or of civil construction works. Another seven companies carry out the collection of vegetable and construction waste from excavation, demolition and earthmoving services through dump buckets. Finally, two of these companies are accredited for both functions described above.

In order to transport the CDW, the transportation company interviewed uses multicranes with a maximum age of ten years old, and can use bucket trucks in cases of transportation of excavation, demolition and earthmoving waste. In addition, in order to better control solid waste collection and transport services, the vehicles have a GPS tracking and monitoring system capable of providing MSCPS real-time access to the primary geo-referencing data as well as the display of the historical tracking data of all accredited vehicles.

#### *4.1.3 Final destination areas*

The areas of waste disposal are sites designated for the processing or disposal of waste. In this research, these areas are represented mainly by recycling plants, IMLAs, transshipment and sorting areas (TSA) and sandbanks. According to data from the city council of Fortaleza (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2019), it is noticed that about half of the total CDW generated in the city is destined to IMLAs, where class A waste is reserved in soil. Subsequently, the sandbanks correspond to 38% of the destination of the CDW. In the local context, the sandbanks do not refer to actual destinations, but regard the commercialization of excavation sand directly between the conveyor and the consumer of the material, monitored by a waste transportation declaration (WTD), in which the conveyor makes a self-declaration of the destination of the sand, followed by the proof of receipt. Recycling plants, which are responsible for the waste treatment, correspond to 8% of waste disposal destination, followed by TSAs, which are responsible for the correct sorting and disposal of 3% of the material (Figure 3).

Figure 3 – All classes waste and class A (except A1) waste percentage according to its final destination 2016 - 2018



Fonte: Author (2019) .

The inclusion of sandy materials resulting from the preparation and excavation of land – nominated A1 by the City Council – greatly interferes in the results, due to the large volume of landfill and earthworks coming from the buildings. In general, this material has adequate conditions of reuse, without needing treatment, being destined for the sandbanks described above. Therefore, considering only class A waste (Figure 3), except class A1 waste, about 71% are destined to IMLAs, followed by recycling plants (27%) and TSA (2%). It can be seen that most of the CDW is focused on the deposit of the material, since class A1 does not demand large investments in equipment or specialized labor – unlike the recycling plants – are considered inert, that is, not harmful to the environment. In addition, the Metropolitan Region of Fortaleza has only two recycling plants in operation – one in the initial stage of the exercise, as described below - leaving the TSAs and IMLAs to the final destination of the waste.

It should be noted that the data presented only cover the numbers registered by the City Council, that is, do not consider waste dumped irregularly in empty lots, clandestine landfills, water bodies, among others, accounting only those that were legally destined for licensed sites. Thus, despite the considerable percentage of CDW reused, the information may not faithfully reflect the global reality of waste generation in the city. In addition, although they are properly destined to recycling plants, the treatment of the material is not always guaranteed due to the low quality of the waste delivered by the constructors or by the lack of specific technology for the treatment of each material.

#### a) Recycling Plants

In the case of recycling plants, it was decided to investigate the performance of two representatives, named here as plants A and B, since they are the only companies in the industry in activity until the collection of these research data (December/2018). The city of Fortaleza is served by two recycling plants in operation, one located in the city itself (plant A) and another located in the neighboring city of Aquiraz (plant B). By definition, recycling plants should prioritize the process of transforming solid waste into inputs or new products (PREFEITURA DE FORTALEZA, 2018b). In practice, however, little progress has been made in this sense, since the lack of correct segregation of the material on site makes it difficult or even impossible to reuse the CDW.

For being new to the market, the plant B still has certain limitations of performance, as a clientele restricted to two companies of collection and transportation. Until now, the company has been receiving mainly Class A demolition and excavation waste, such as paving stones

and asphalt slabs, which are crushed in a mobile plant, giving rise to aggregates for use in building works and infrastructure. The final product is kept in the plant itself, while other materials such as wood and steel are transferred to other licensed plants.

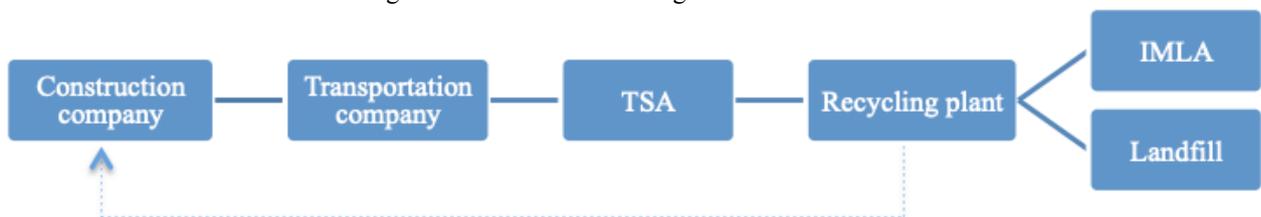
On the other hand, operating for 20 years with demolition and CDW treatment, the plant B has space limitations for eventual segregation of the material, which justifies the requirement for receiving residues that are already adequately segregated on site and preference for receiving waste from excavations and demolitions works. Another disadvantage resultant from the insufficient space is the lack of storage space for recycled products, which leads to the production of its products only according to market demand. Thus, while virgin products are mass-produced at attractive prices, recycled materials require a request in advance, resulting in a delay that most construction companies are unwilling to submit to.

Class A waste, treated on site, gives rise to coarse aggregates, fine aggregates and stone dust, as well as recycled bricks. Other materials that may be contained in Class A waste containers, such as wood, steel, paper and plastic, are sold to companies specialized in their treatment.

*b) Landfill areas and transshipment and sorting areas*

In general, the waste generated by the construction companies is primarily transported to recycling plants due to the prioritization of the reuse and the shorter distance traveled compared to the landfill located outside the city. In essence, landfills should not receive construction waste and are the last solution to the CDW, after being considered as waste to builders, TSAs and recycling plants. In addition to these sites, IMLAs are also common destinations for Fortaleza's CDW, according to the Coletas Online system (Figure 4).

Figure 4 – CDW Reverse Logistics Path in Fortaleza



Fonte: Author (2019).

In theory, while TSAs are destined to receive waste, for sorting, temporary storage of the segregated materials, eventual transformation and subsequent removal for proper disposal, the IMLAs consist of places for the disposal of Class A waste in the soil, aiming for the reservation that allows its future use or future use of the area, in the lowest volume possible, without causing damage to public health and the environment. However, the application in practice has pointed to a certain definition problem of these functions.

Considering the above concepts, the IMLA investigated has merged the tasks of both final destinations mentioned. Although there is confinement of part of the class A waste on site, for ground leveling and temporary plaster reserve, most of the CDW - which is delivered in a mixed manner - undergoes a manual sorting. Materials such as cardboard, plastic and metal are separated and destined to recyclers or recycling cooperatives, while wood and tree pruning undergoes an on-site processing, giving rise to chips or wood chips.

The company has plans to rent a crusher in order to expand its activities by reusing Class A waste delivered to IMLA. One of the obstacles to the acquisition of machinery for such activity is the uncertainty of the quality of the material delivered by the builders. Ensuring the quality of recycled gravel becomes difficult, since the raw material is usually of poor quality. As a result, much of this material is used as the base and sub-base of the plant's own site.

#### *4.1.4 Public authority*

MSCPS plays a key role in the waste management policy of the city of Fortaleza. An example of this is the creation of the Solid Waste Management Action Program, characterized by the implementation of progressive actions in various districts and regions of the city, involving solutions in areas such as environmental legislation review, ecopoints creation, the electronic system Coletas Online control, accreditation and monitoring of transportation vehicles, among others.

In order to strengthen the public authorities' instruments of action in relation to violations and encourage compliance, MSCPS has been involved in reviewing the legislation of the large generators through the following measures:

- creation of new types of infractions and penalties;
- increased penalties for violators;
- incorporation of new measures, such as administrative closures, removal of vehicles and equipment;
- linking the maintenance of the operating license to compliance with the legislation;
- possibility of inclusion of the debtor in a public register of defaulters.

To meet the needs of small volume waste generators and conveyors, ecopoints were created, consisting of a set of areas available to the population for the voluntary delivery of CDW's such as debris, prunings, cardboard, plastics, glass and metals. In this way, preventive collection has been prioritized, where the material is deposited in suitable places, instead of the corrective collection, where the residue is collected in inappropriate places.

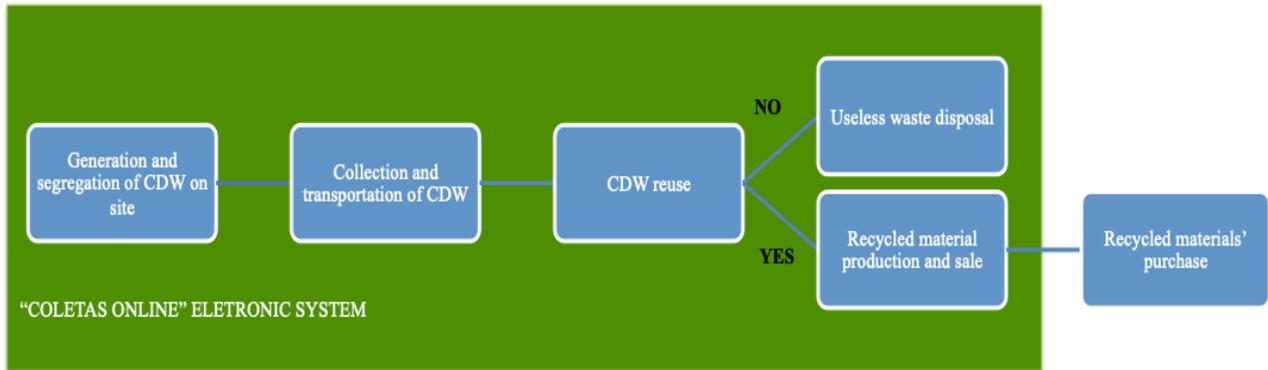
The implementation of the electronic system Coletas Online is another action recently developed by MSCPS. Based on the CDW management system of the city of Jundiaí – SP, this system was implemented in Fortaleza in 2015 with the objective of integrating the actions of the City Council and the service providers through online accreditation, service request, inspection and monitoring of CDW transportation, among others. Further details about this CDW management system will be provided in section 4.2.

Finally, the accreditation of transportation companies to the City Council evaluates several aspects, such as their technical, operational and financial capacity, for the adequate provision of the service. Thus, the authorization of the transportation activity is conditioned to the fulfillment of documentary requirements and fleet inspection. From this, MSCPS draws up a list of accredited transportation companies, that is, suitable and authorized servers for the collection of solid waste characterized as non-hazardous (ABNT, 2004) and generated by commercial, industrial and service providers' activities with volumes equal to or greater than 100 liters per day.

## **4.2 Steps for CDW reverse logistics**

The CDW's reverse logistics consists of a sequence of activities performed by the actors described above, in order to know its operation, identify failures and propose improvements for the system. According to Figure 5, which portrays the reality of Fortaleza, the builder starts the process by generating waste, seeking to reduce volumes, segregating the waste on site and depositing it in containers supplied by the conveyors. The CDW transported by a licensed and accredited company may or may not be reused, depending on the class of the waste.

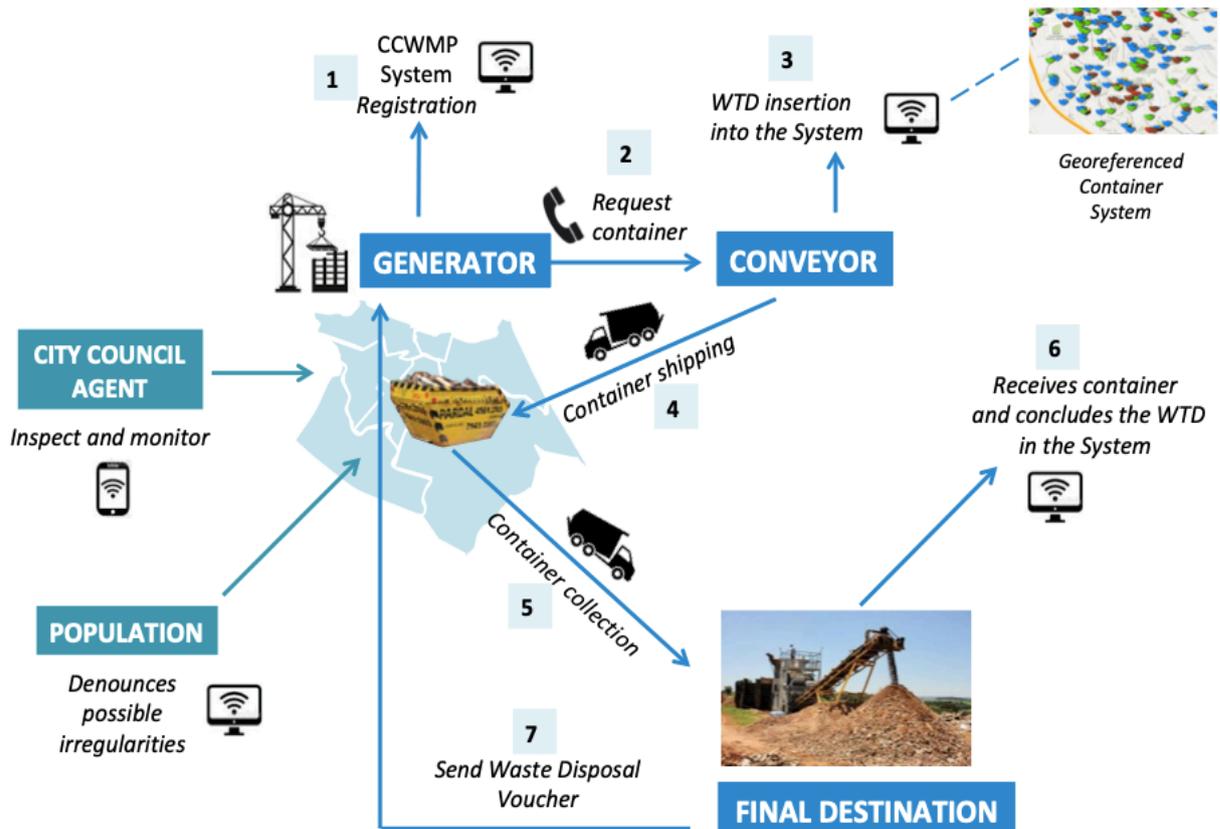
Figure 5 – Processes' flow



Fonte: Author (2019).

In cases of impossibility of treatment, the waste is disposed on landfill areas. Otherwise, the material is allocated for recycling plants, TSAs or IMLAs according to the waste reversibility potential. Finally, the production and sale of recycled products is responsible for the return of the material to the consumer market inside and outside the construction industry. Throughout this reverse chain, the Coletas Online system works as a tool to support the management of these activities. In general, the use of this system occurs with the help of the internet, which makes waste management faster and more practical by sharing information in real time by its members.

Figure 6 – Solid waste control electronic system's implantation

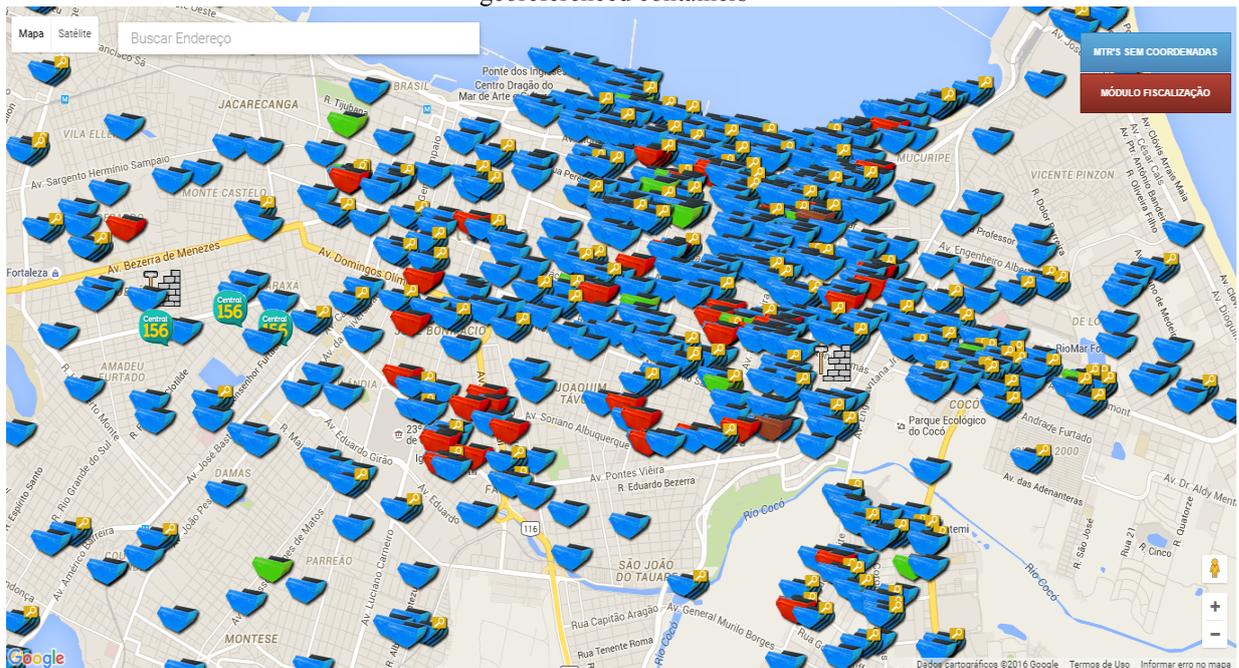


Fonte: Prefeitura de Fortaleza (2016).

Figure 6 illustrates the actions made possible by the use of this tool. The first step consists of the CCWMP registration in the system by the construction company, followed by the choice of an accredited company available on the City Council website. The WTD input – containing

characteristics, quantification, origin and final destination of the waste – begins with the notification of the dispatch of the requested containers, which must contain the identification and the location of the generators and conveyors through the containers georeferencing located on site. When the shipment records and/or the removal of buckets are made in the system, both the municipality and the other stakeholders have control of the location of the parked, in transit and delivered buckets, as well as the delays for removal and transportation of the CDW to the landfill (Figure 7).

Figure 7 – Real-time identification and location of generators and conveyors through the of the site located georeferenced containers



Fonte: Prefeitura de Fortaleza (2016).

The traceability of the CDW also enables the visits of inspectors and the sending of photographic records that prove the conditions of the containers and the CDW collected. The colors informed in the Coletas Online system indicate the situation of each container at the time of the survey, namely: green – regular bucket and waste; blue – bucket to be inspected; brown – irregular waste, subject to further inspection; red – clandestine company bucket; white – missing bucket; black – seized bucket.

The WTD confirmation is given after the container delivery and the checking of the CDW classification at the final disposal site. According to the interviewees, this verification is due to the frequent incompatibility between the class of residue in the WTD and the content, in fact, transported. In case of classification conflict, "Delivery with divergence" is registered in the system, which causes the CDW to be reclassified at the final destination. After completing this step, the waste destination confirmation is sent to the participants.

All the system data allow a better planning of preventive and directive actions capable of debureaucratizing and organizing the information of all the companies and entities involved. Among its functionalities, there are: accreditation of conveyors and final destinations; ease of choice of authorized conveyors and drive for the dispatch or removal of buckets; registration of WTD request; quick access to system information to search for notifications and generate infringement notices; container georeferencing, which allows the low cost inspection of vehicles and buckets; inhibition of the action of clandestine companies; control of final destination; monitoring of the TSA's situation regarding the volume of exceeding waste; and

generation of indicators, responsible for assisting in the elaboration of more effective public policies.

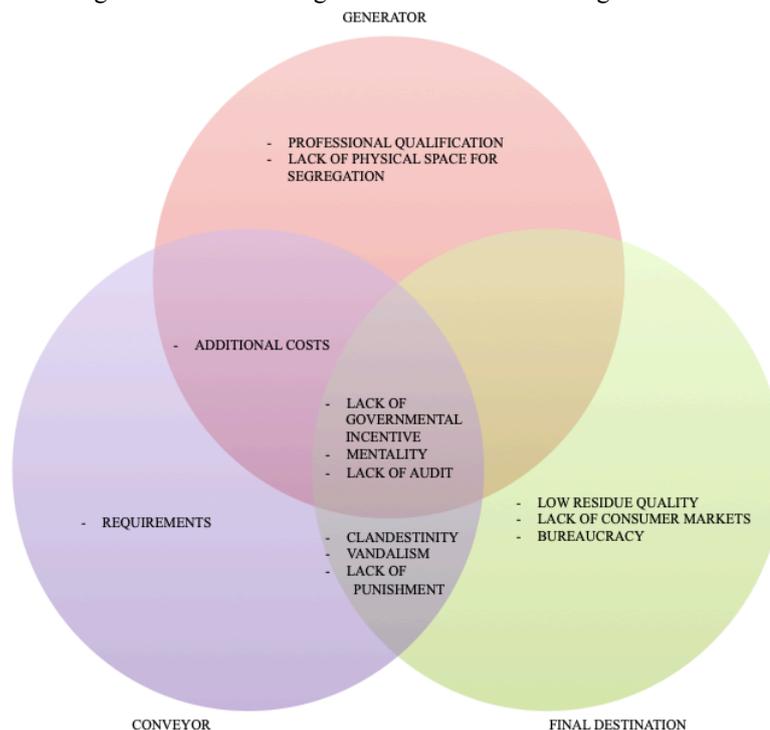
### 4.3 Obstacles to the progress of waste management in the city of Fortaleza

The CDW management is often characterized by several obstacles that hinder or even impede its full deployment and/or optimization. The stakeholders activities' chain ends up interfering significantly in the flow of the process, since the results of the actions of one stakeholder affect directly or indirectly the actions of its successor in the chain. Figure 8 shows, in a didactic way, the main obstacles mentioned by interviewees for the maturation of the reverse chain.

It widely known among the parties interviewed that the lack of concern or mentality regarding environmental issues is one of the main obstacles to improve the construction waste management. The lack of knowledge and interest on the subject and the prevalence of financial issues over environmental aspects can also be included. During the interviews, all the participants mentioned the difficulty in changing the thinking of managers and construction workers as the possible cause of other problems, such as lack of supervision and government incentives.

In theory, any construction and infrastructure activities should contain data such as waste classification and quantification, waste volume generated monthly (Fortaleza, 2004), as well as segregation on site and destination for recycling plants (Fortaleza, 2011). However, the preferential – which implies a non-obligation – segregation or sorting of the waste at the origin, described in CONAMA resolution No. 307, leads the generators to a discretionary attitude regarding the separation of the CDW components. In addition, in practice, the Fiscalization Agency of Fortaleza is also known by its deficiencies in the inspection of such requirements, which makes it difficult to take preventive and corrective measures. According to the interviewees, this is mainly due to the disqualification of the prosecutors to the execution of their role.

Figure 8 –Waste management obstacles according to its stakeholders



Fonte: Author (2019).

The absence or inefficiency of supervision ends up being compromised with companies that act in an irregular way. Examples include the lack of a license for the execution of Works and the non-reduction and non-segregation of waste on site by the builders. The delay in the useless waste disposal and the receiving of waste outside the Coletas Online system is also a recurring issue among the interviewees. In addition, in the case of conveyors, the activities of several non-accredited companies, not sending the WTD and the use of uncredited vehicles to increase the operational capacity of accredited companies are some of the complaints presented by the interviewees.

It is perceived that the expenses that a regularized company spends to meet sustainable goals end up making its contracting financially less advantageous than an irregular company. According to MSCPS data, garbage collectors and unlicensed transportation companies offer services at prices that correspond to one-third of the prices practiced by the regular market. As a result, the third obstacle, which deals with the lack of government incentives, becomes more understandable, since the implementation of various advantages, such as tax deductions, ends up making companies adhering to environmentally sound practices more competitive than the others .

According to those responsible for transportation and final destination, the lack of punishment inexorably drives the action of clandestine companies to remain active in the market. However, at the same time as the survey participants reveal a loosening of the law enforcement to fight clandestinity, they point out excessively heavy penalties on companies with legal action in the market.

If this were not enough, such actors cite vandalism as another way of discouragement to their activity. The theft products hidden by employees and the deposit of all kinds of waste by employees or third parties, without the knowledge of those responsible, in the containers, as well as graffiti of the stationary buckets – which can result in fines for its supplier, because of the impediment of the container identification – are some of the occurrences mentioned by the interviewees. There are also cases where the deliberate camouflage of mixed waste in the lower part of the bucket is practiced by the arrangement of segregated waste at the top to reduce the transportation costs. Thus, sometimes the waste classified as recyclable – which has a lower cost in both the construction-conveyor transaction and the final conveyor-destination – may require appropriate segregation and reclassification – which leads to a readjustment of the prices to be paid and an increase of work – or even the disposal of the materials, since they have been irreversibly contaminated, making them useless for future treatments.

In fact, the performance of some construction companies in disagreement with the SWNP (BRASIL, 2010a) prescription was strongly emphasized during the survey, being considered the main responsible for not reusing much of the CDW. In addition, cases where only part of the waste is transported by licensed companies during the day while another part is disposed of in irregular locations at night have been mentioned as frequente, as they represent a significant reduction of costs. It is noticed that shared responsibility is not always considered, since there is no concern on the part of the construction company in knowing the end given to the residue.

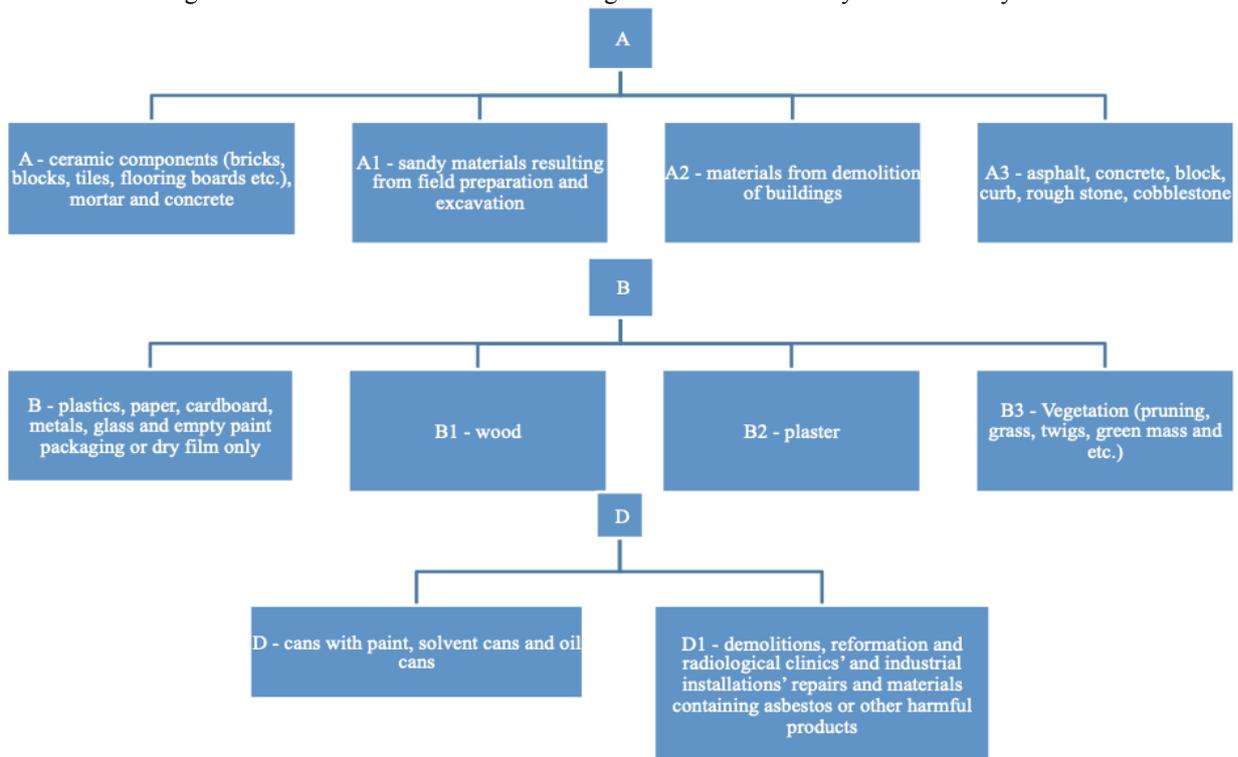
In addition, a common concern among generators and conveyors, the additional costs related to sustainable measures were cited as barriers to compliance with environmental guidelines. The purchase of materials for the waste segregation, a larger number of containers rental, personnel training, the need for eventual purchase of vehicles and expenses with the recycling plant and/or landfill area are examples of requirements that burden substantially the expenses of the stakeholders.

Finally, the final waste disposal sites face specific problems, even though they have strategies to combat them. If on the one hand these residues have a scientifically proven potential to act

as substitutes for construction materials, on the other hand, the poor quality of their contents, lack of techniques or high treatment costs limits the production of recycled materials that attract the consumer market, both in terms of quality and in relation to uncompetitive prices. Added to this, the bureaucratization for the opening and maintenance of this type of company has served as a great discouragement for the growth of this market in the city.

According to MSCPS member, the classification used by CONAMA (classes A, B, C and D) is considered deficient, since each class covers a too wide range of diverse nature components that make the destination of the residue difficult. As a result, the MSCPS uses subclassification according to the future use that will be given for each material, as shown in Figure 9.

Figure 9 – Subclassification for the management of the CDW by Fortaleza City Council



Fonte: Author (2019).

## 5 CONCLUSION

The research proved the need to study the CDW reverse chain – including its actors, functions and activities – to propose appropriate solutions to the obstacles listed by its participants. This need is due, in large part, to the interdependence of the actors in the chain, which ends up conveying the positive or negative consequences of an action for other participants, such as price increases, less use of waste, less production of recycled products or supply of recycled materials of inferior quality, greater occupation and consequent diminution of the useful life of landfill areas, among others.

Through the analysis of the processes' flow, it was verified that financial incentives such as reduction of taxes for producers and consumers of recycled products are necessary. Regarding compliance with environmental standards, it seems that the economy conquered with illicit practices still seems to compensate for the fines imposed by the inspection body. There is a need for greater severity in the imposition of penalties and the establishment of an environmental target plan that stimulates accountability. Along with this, awareness policies, the normalization of sustainable behaviors, such as the mandatory segregation of CDW on

site; the subdivision of the CDW classes; the mandatory minimum consumption of recycled products and the investment in research to make the reuse of the CDW feasible are measures capable of mitigating the negative impacts of the reported obstacles.

Methods of waste quantification, such as the Coletas Online system, also represent useful aid instruments for generators and inspectors. This type of tool assists both in the estimation of volumes produced – capable of facilitating decision making and minimization, segregation and packing action plans – as well as in the verification of the estimated and the actual CDW volume transported to the final destination. In addition, systematization of data on the actual generation of waste by work, by surveying the exit volumes of the builders and entering the mills and landfills, would facilitate the control and investigation of possible deviations for irregular destinations.

The interviews allowed the knowledge of the generated waste, as well as the first components reused in the recycling plants; the actions taken to reduce waste on site; and the ways of treatment and reinsertion of the recycled product in the production chain. It is concluded that there is preference for the treatment of debris, wood and plaster, to the detriment of plastic materials and papers. It is noteworthy that, especially in relation to rubble, reuse techniques are already quite popular. Wood has also become useful as biomass used in factories. However, plaster still has not aroused so much interest in reuse research and it does not have so many techniques or specialized companies in the region.

Thus, it was concluded that the objectives of analyzing the waste generation chain in Fortaleza under a sustainable perspective and proposing improvements to the reverse logistics process were achieved. For future research, it is suggested the search for a greater number of stakeholders, such as other companies, inspection body, recycling cooperatives, that can ratify and aggregate information on reverse logistics. The creation of local indicators would also be useful for predicting the average composition of the CDW generated, which would facilitate palliative and preventive management decisions. The survey of international legislation on the subject, with the purposes of comparing it with local legislation, are also useful for the development of efficient practices.

## **BIBLIOGRAPHIC REFERENCES**

ABRECON. **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015: A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo, 2015. Disponível em: < <https://bit.ly/2sj5Hh5> >. Acesso em: 10 jan. 2018.

BANIAS, G.; ACHILLAS, C.; VLACHOKOSTAS, C.; MOUSSIOPOULOS, N.; PAPAIOANNOU, I. *A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste*. **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2497–2502, 2011.

BOHNENBERGER, J. C. et al. Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 299–311, 2018.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da União. Brasília, 2010a.

BRASIL. Decreto Federal nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências**. Diário Oficial da União. Brasília, 2010b.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da**

**composição do RCD.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CEARÁ. Lei Estadual nº 13.103, de 24 de janeiro de 2001. **Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá providências correlatas.** Diário Oficial do Estado. Fortaleza, 2001.

CEARÁ. **Decreto Estadual nº 26.604, de 16 de maio de 2002.** Diário Oficial do Estado. Fortaleza, 2002.

CHILESHE, N.; RAMEEZDEEN, R.; HOSSEINI, M. R.; LEHMANN, S. *Barriers to implementing reverse logistics in South Australian construction organisations.* **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 20, n. 2, p. 179–204, 2015.

CHILESHE, N.; RAMEEZDEEN, R.; HOSSEINI, M. R. *Drivers for adopting reverse logistics in the construction industry: a qualitative study.* **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 23, n. 2, p. 134–157, 2016.

COELHO, A.; DE BRITO, J. *Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part I: Location, materials, technology and economic analysis.* **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338–352, 2013.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; DA SILVA, G. A. C.; ... DOS SANTOS, A.. *Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (BRASIL case-study).* **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594–600, 2016.

FORTALEZA. Lei Municipal nº 8.408, de 24 de dezembro de 1999. **Estabelece normas de responsabilidade sobre a manipulação de resíduos produzidos em grande quantidade, ou de naturezas específicas, e dá outras providências.** Diário Oficial do Município. Fortaleza, 1999.

FORTALEZA. **Decreto Municipal nº 10.696, de 2 de fevereiro de 2000.** Diário Oficial do Município. Fortaleza, 2000.

FORTALEZA. Lei Municipal nº 10.304, de 28 de abril de 2015. **Altera os arts. 1º ao 33 da Lei nº 8.408, de 24 de dezembro de 1999, e dá outras providências.** Diário Oficial do Município. Fortaleza, 2015.

HOSSEINI, M. R.; CHILESHE, N.; RAMEEZDEEN, R.; LEHMANN, S.. *Reverse logistics in the construction industry.* **Waste Management & Research**, v. 33, n. 6, p. 499–514, 2015.

LAU, H. H.; WHYTE, A. A.; LAW, P. L. *Composition and characteristics of construction waste generated by residential housing project.* **International Journal of Environmental Research**, v. 2, n. 3, p. 261–268, 2008.

LEAL, D. A.; ANGELIM, V. L.; BARROS NETO, J. DE P. **Logística reversa aplicada à construção civil: uma revisão sistemática da literatura.** Sustentabilidade na Construção. Anais...Porto, Portugal: Construção 2018, 2018

LOCKREY, S.; NGUYEN, H.; CROSSIN, E.; VERGHESE, K. *Recycling the construction and demolition waste in Vietnam: opportunities and challenges in practice.* **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 757–766, 2016.

MÁLIA, M.; DE BRITO, J.; PINHEIRO, M.D.; BRAVO, M. *Construction and demolition waste indicators.* **Waste Management & Research**, v. 31, n. 3, p. 241–255, 2013.

MANOWONG, E. *Investigating factors influencing construction waste management efforts in developing countries: an experience from Thailand.* **Waste Management & Research**, v. 30, n. 1, p. 56–71, 2012.

MIRANDA, L. F. R. et al. Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. **XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 21, 2016.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NASIR, M. H. A. et al. *Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry*. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 443–457, 2017.

OGUNBIYI, O.; GOULDING, J. S.; OLADAPO, A. *An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK*. **Construction Innovation**, v. 14, n. 1, p. 88–107, 2014.

OLIVEIRA, M. E. D.; SALES, R.J.M.; OLIVEIRA, L.A.S.; CABRAL, A.E.B. Diagnóstico da geração e composição de RCD em Fortaleza. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 219–224, 2011.

PEREIRA, A. L.; BOECHAT, C.B.; TADEU, H.F.B.; SILVA, J.T.M.; CAMPOS, P.M.S. **Logística reversa e sustentabilidade**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

PERO, M.; MORETTO, A.; BOTTANI, E.; BIGLIARDI, B. Environmental Collaboration for Sustainability in the Construction Industry: An Exploratory Study in Italy. **Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 125, 2017.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **Ecopontos**. Disponível em: <<https://goo.gl/uPQkXu>>. Acesso em: 26 out. 2018b.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **Relação de transportadores licenciados e credenciados atualizada em 23.10.2018**. Disponível em: <<https://goo.gl/a6iBHB>>. Acesso em: 26 nov. 2018a.

PREFEITURA DE FORTALEZA. **Relatório da Geração de Resíduos da Construção Civil em Fortaleza**. Disponível em: <<https://goo.gl/CdfRVK>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

SAIEG, P.; SOTELINO, E.D.; NASCIMENTO, D.; CAIADO, R.G.G. Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 788–806, 2018.

SILVEIRA, G. T. R. **Metodologia de caracterização dos resíduos sólidos, como base para uma gestão ambiental: estudo de caso: entulhos de construção civil em Campinas-SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1993.

SUNDARAKANI, B. et al. *Modeling carbon footprints across the supply chain*. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 1, p. 43–50, 2010.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 339–346, 2010.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2003.



# INFLUÊNCIA DA CORREÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA

Rafael Almeida Santana<sup>(1)</sup>, Henrique Almeida Santana<sup>(2)</sup>, Cleidson Carneiro Guimarães<sup>(3)</sup>

(1) Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - rafael.almeidasantana@hotmail.com;

(2) Universidade Federal da Bahia - almeidahen@gmail.com;

(3) Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - cleidsonguimaraes@ufrb.edu.br.

## RESUMO

O esgotamento das jazidas de agregados naturais próximo aos grandes centros urbanos e as restrições ambientais à sua extração tem se tornado um fator dificultante para obtenção deste material. Entretanto, existe uma crescente disponibilidade de areia de britagem, tornando pertinente a compreensão do seu comportamento em matrizes cimentícias. Estabeleceu-se um programa experimental onde, realizou-se a caracterização de dois agregados naturais e uma areia de britagem, aplicando-os individualmente ou combinados em argamassas. As argamassas produzidas com a utilização de areia de britagem e agregados combinados (naturais e de britagem) destacaram-se por apresentarem propriedades melhores quando comparadas com as argamassas produzidas somente com agregados naturais.

**Palavras-chave:** Composição granulométrica, areia natural, areia de britagem.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF GRANULOMETRIC CORRECTION OF AGGREGATES IN THE PROPERTIES OF THE MORTAR

### ABSTRACT

The depletion of the deposits of natural aggregates near the great urban centers and the environmental restrictions to its extraction has become a difficult factor to obtain this material. However, there is a growing availability of manufactured sand, making it pertinent to understand their behavior in cemented matrices. An experimental program was established where the characterization of two natural aggregates and one manufactured sand was realized, applying them individually or combined in mortars. The mortars produced with manufactured sand and combined aggregates (naturals and manufactured) were distinguished by their better properties when compared to mortars produced only by natural aggregates.

**Key-words:** Granulometric composition, natural sand, manufactured sand.



## 1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Agência Nacional de Mineração, 2016, a areia de leito de rio é a mais utilizada entre as areias naturais, enquanto que, entre as artificiais, a areia de britagem é a que apresenta maior consumo<sup>(1)</sup>. Entretanto, as restrições ambientais à retirada de areia dos leitos de rios e a elevada distância de transporte entre jazidas naturais e regiões metropolitanas, são razões que impulsionaram o crescente consumo de um subproduto da produção de brita, a areia de britagem. Uma vez que sua produção pode ser realizada em pedreiras próximas ao seu consumo, este material já é utilizado para produção de concretos e argamassas em todo o mundo<sup>(2,3)</sup>.

Recentemente, diversas pesquisas foram direcionadas para a utilização de agregados alternativos aos agregados naturais. Estudos sobre a utilização de rejeito de minério de ferro na produção de concreto de alto desempenho, evidenciando a possibilidade de substituir em até 40% o agregado convencional por esse material<sup>(4)</sup>. Ainda nesse sentido, pesquisa avaliando a substituição de agregados naturais por agregados de concreto reciclado em argamassas, mostraram que as argamassas produzidas com agregados reciclados não obtiveram o mesmo desempenho mecânico que as argamassas produzidas com agregados naturais<sup>(5)</sup>. Ambos os estudos evidenciaram a necessidade de aprofundadas avaliações nas propriedades da matriz ao inserir um material alternativo.

Com a diversidade dos agregados disponíveis, torna-se fundamental o estudo de suas propriedades, pois, suas características podem atuar no desempenho das matrizes cimentícias, afetando a trabalhabilidade no estado fresco e a microestrutura no estado endurecido<sup>(6)</sup>. As Argamassas que necessitam de boa trabalhabilidade e elevada compacidade podem ser obtidas por meio do controle da distribuição granulométrica, proporção adequada de finos, índice de forma do agregado e controle da relação água/cimento.

Amenta *et al.* ressaltam que o emprego da correta seleção dos grãos dos agregados promove o reaproveitamento de resíduos da cadeia produtiva da mineração, reduzindo o uso da areia natural, diminuindo os impactos causados na sua extração e reduzindo o custo, já que as areias produzidas no processo de britagem são geralmente mais baratas <sup>(6)</sup>.

Considerando a importância da intervenção na formulação de matrizes granulométricas, tornando-as mais compactas, e produzindo matrizes cimentícias mais resistentes e duráveis, este trabalho propôs avaliar o desempenho da areia de britagem e a influência da distribuição granulométrica definida pela



NBR 7211<sup>(8)</sup> e proposto por Lobo Carneiro<sup>(9)</sup>, nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Utilizou-se o cimento Portland (CP II-Z-32), dois agregados naturais com diferentes granulometrias e regionalmente conhecidos na região do Recôncavo da Bahia por areia branca (AB) e areia lavada (AL). Utilizou-se também a areia de britagem (ABR), agregado artificial produzido em britador de impacto. As caracterizações granulométricas dos agregados determinadas conforme NBR NM 248<sup>(10)</sup> são exibidas na Figura 1 e melhores distinguidas pela Figura 2.

Figura 1 – Distribuição granulométrica da AL, AB e da ABR.

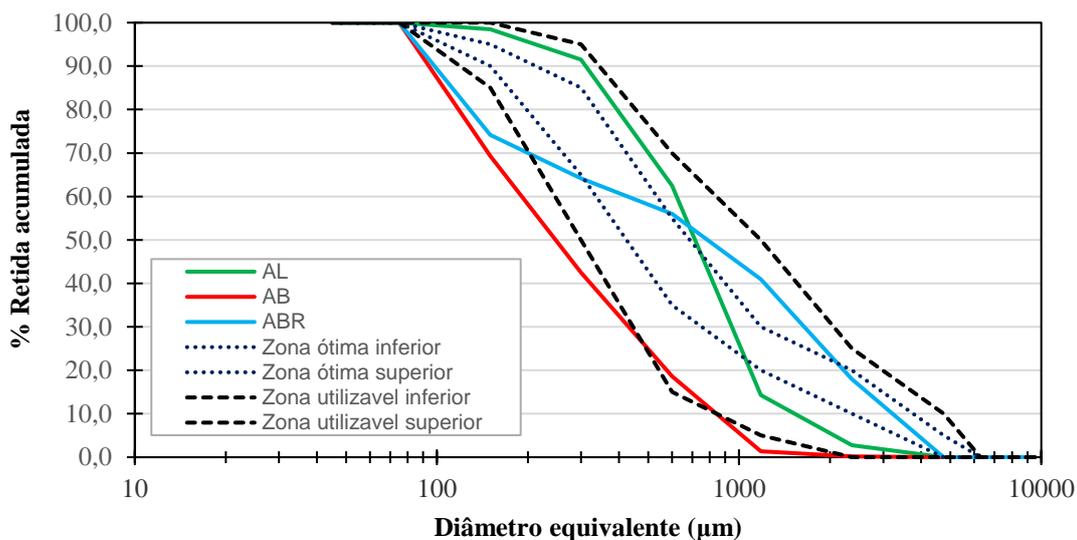
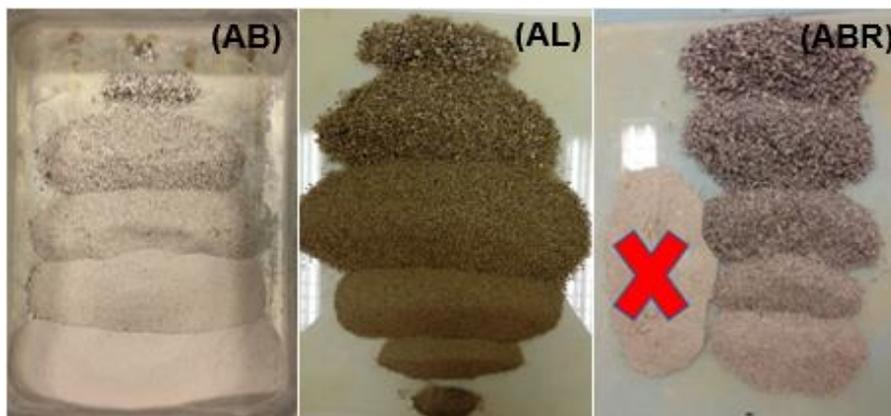


Figura 2 – Frações granulométricas dos três agregados naturais utilizados (AB, AL e ABR).





Optou-se por descartar a fração passante na peneira 75 µm da ABR, pois essa fração poderia influenciar na obtenção da composição contemplada pelos limites da NBR 7211<sup>(8)</sup>, inviabilizando o objetivo do presente trabalho.

## 2.2 Métodos

Com a caracterização granulométrica dos agregados e utilizando o software Excel, foram geradas curvas que representam os intervalos da zona utilizável e da zona ótima, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Realizou-se posteriormente duas composições granulométricas., pelo método iterativo, que consiste em sucessivas tentativas e erros, até que se obtenha a melhor proporção de cada uma das areias, por meio do software acima citado.

A composição C1 foi determinada utilizando apenas os dados da caracterização granulométrica das areias naturais (AB e AL). Em seguida as areias foram misturadas nas proporções pré-determinadas pelo software. Para a segunda composição (C2), repetiu-se o processo utilizando os três agregados (AB e AL e ABR). Para a areia de britagem foi descartado o material passante na peneira 0,15 µm por apresentar uma quantidade elevada de material pulverulento, o que impossibilitava a adequação desta curva aos limites da zona ótima.

Para o preparo das argamassas, seguiu-se os procedimentos da NBR 7215<sup>(11)</sup>, utilizou-se o traço 1:3 (aglomerante/agregado), indicado pela mesma norma. Determinou-se os índices de consistência (flow table) das argamassas conforme a NBR 13276<sup>(12)</sup>. O ensaio consistiu em fixar o espalhamento requerido da argamassa em 255 mm ± 10 mm, considerado padrão por Silva<sup>(13)</sup>, possibilitando determinar a relação água/cimento necessária para alcançar esse espalhamento.

Corpos de prova cilíndricos com 50 mm x 100 mm (diâmetro x altura) foram moldados conforme a NBR 7215<sup>(11)</sup>, seguido de cura ao ar por 24 horas e cura submersa em água saturada com cal por 27 dias. Os corpos de prova foram produzidos em 5 grupos: AAB - argamassa com areia branca, AAL- argamassa com areia lavada, AABR – argamassa com finos de britagem, AC1 – argamassa com a composição 1 e AC2 argamassa com a composição 2. Após a cura, realizou-se o ensaio para determinação da resistência à compressão axial de acordo com a NBR 7215<sup>(11)</sup> e da absorção de água por imersão conforme a NBR 9778<sup>(14)</sup>.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Composições dos agregados

Analisando as distribuições granulométricas dos agregados e das composições exibidos na Tabela 1, nota-se que os agregados naturais apresentam diferentes características granulométricas e que não se encaixam completamente nos limites ótimos e utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211<sup>(8)</sup>.

A composição 1 (C1) da areia AB com a areia AL, que melhor se ajustou aos limites da NBR 7211<sup>(8)</sup> foi a combinação de 20% da areia AB e 80% da areia AL, enquanto que a melhor composição das três areias (AB, AL e ABR) foi 32% da areia AB, 32% da areia AL e 36% da ABR.

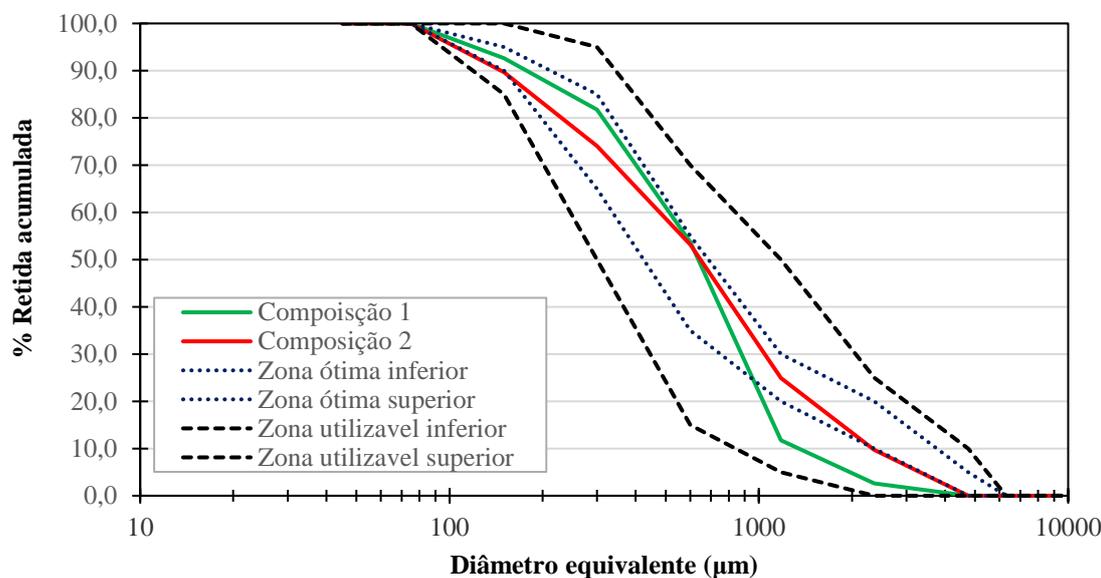
Tabela 1 – Caracterização física dos agregados utilizados

Limites estabelecidos conforme a		Peneiras (µm)						
		4750	2360	1180	600	300	150	75
ABNT NBR 7211 <sup>(8)</sup>								
Zona utilizável	Lim. inferior (%)	0	0	5	15	50	85	90
	Lim. superior (%)	10	25	50	70	95	100	100
Zona ótima	Lim. inferior (%)	0	10	20	35	65	90	100
	Lim. superior (%)	5	20	30	55	85	95	100
Areia branca	Retida acumulada (%)	0	0,16	1,38	18,65	42,52	69,33	100
Areia lavada	Retida acumulada (%)	0	2,78	14,31	62,49	91,53	98,45	100
Areia de britagem	Retida acumulada (%)	0	17,99	40,96	56,03	64,18	74,14	100
Composição 1	Retida acumulada (%)	0	2,6	11,73	53,72	81,73	92,63	100
Composição 2	Retida acumulada (%)	0	9,68	24,91	53,17	74,06	89,69	100

Analisando a Figura 3, observa-se que a granulometria da C1 se encontra totalmente inserida na zona utilizável, entretanto, não se encaixou totalmente na zona ótima. A composição C2 apresenta melhor aproximação ao centro dos limites da zona ótima proposta pela NBR 7211.

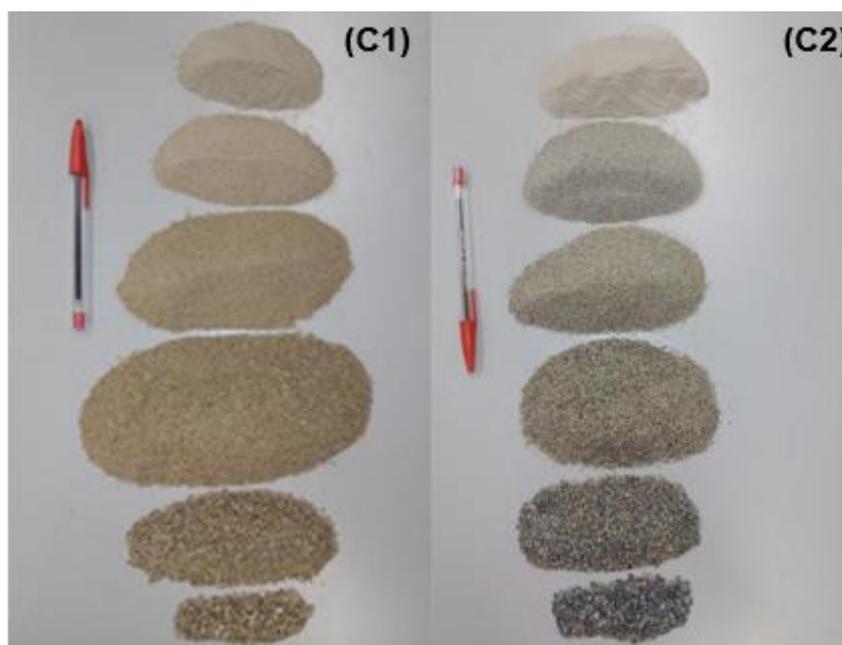


Figura 3 – Distribuição granulométrica da composição C1 e da composição C2



Comparando as curvas granulométricas das duas composições, nota-se a importância da inserção da areia de britagem (ABR) na obtenção de um agregado mais próxima aos limites normatizados. Essa influência está relacionada com a maior proporção de materiais retidos nas peneiras 2360 µm e 1180 µm da ABR, frações que são encontradas em menores proporções nos agregados naturais (AL e AB). Na Figura 2 observa-se as frações granulométricas da composição 1 (C1) e da composição 2 (C2), evidenciando a composição de distintos agregados em ambas as distribuições.

Figura 4 – Distribuição granulométrica da composição 1 e da composição 2





## 3.2 Avaliação das propriedades da argamassa

### 3.2.1 Consumos de água das argamassas no estado fresco

As diferentes relações água/cimento para as diferentes argamassas utilizadas na pesquisa, obtidas por meio do espalhamento das argamassas, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Determinação da relação a/c por meio do espalhamento médio das argamassas

Amostra	Espalhamento Médio (mm)	DP	CV (%)	Relação a/c
AAB	261,56	4,38	1,67	0,53
AAL	256,86	4,83	1,88	0,54
AABR	263,50	0,23	0,09	0,51
AC1	263,83	5,61	2,12	0,48
AC2	260,00	4,39	1,69	0,50

Em que: AAB - Argamassa com Areia Branca; AAL - Argamassa com Areia Lavada, ABR - Argamassa com Areia de Britagem, AC1 - Argamassa com Composição 1 e AC2 - Argamassa com Composição 2.

Estes resultados evidenciam que as argamassas produzidas com as composições granulométricas (C1 e C2) necessitam de menor consumo de água para obter a mesma consistência que as argamassas produzidas pelos demais agregados.

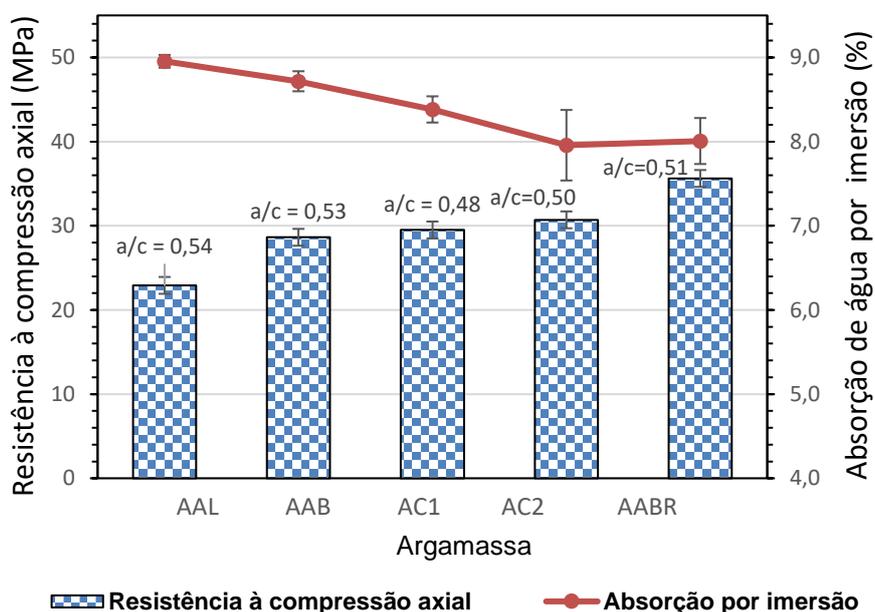
Funk e Dinger<sup>(15)</sup> ressaltam que a eficiência do empacotamento das partículas é inversamente proporcional à viscosidade do escoamento da matriz, quase toda a água disponível é usada para molhar as superfícies das partículas, reduzindo o atrito entre os grãos, além de reduzir os vazios e conseqüentemente a quantidade de água nos poros. Estas constatações associadas ao menor consumo de água das composições (C1 e C2) é um indicativo de que a composição dos agregados pode estar melhorando o arranjo granulométrico da matriz. Entretanto, melhores evidências seriam obtidas por meio das massas específicas absolutas dos agregados.

### 3.2.2 Resistências à compressão axial

Na Figura 5 observa-se o comportamento da resistência à compressão axial e da absorção de água das argamassas em estudo. Nota-se também uma tendência do aumento de resistência à compressão axial à medida que ocorre redução da absorção de água.



Figura 5 – Resistência à compressão axial x absorção de água por imersão das argamassas em avaliação



A AABR destacou-se por apresentar elevada resistência e reduzida absorção de água por imersão, quando comparado com as demais argamassas. A AAL apresentou comportamento inverso, com menor resistência e maior absorção de água. Após a realização da análise de variância (ANOVA), confirmou-se que há uma diferença significativa entre os grupos de ambas as propriedades avaliadas (Tabela 3).

Tabela 3 – Confiância estatística para a resistência à compressão axial e para a absorção de água por meio de análise de variância (ANOVA)

Propriedade	SQ	GL	MQ	F	valor-P	Fc	Efeito significativo
Resistência à compressão (MPa)	498,85	4,00	124,71	35,80	5,216E-10	2,76	SIM
Absorção de água por imersão (%)	4,55	4,00	1,14	25,37	1,745E-08	2,76	SIM

Nota: SQ = Soma Quadrada; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrada; F = Valor calculado de F; Valor – P = Nível de significância; Fc = F Crítico; Se  $p < 5\%$  e  $F_c < F$ , o efeito é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Complementando a ANOVA, o teste estatístico de Tukey, para a resistência à compressão axial, evidenciou que as argamassas AAB, AC1 e AC2 não apresentaram variação significativa de desempenho, ademais, pode-se comprovar o baixo desempenho da AAL e o alto desempenho da



AABR. O teste Tukey confirmou também que as argamassas AABR e AC2 apresentaram menor absorção de água, e que a variação de absorção entre essas duas argamassas não é significativa.

O comportamento da AABR converge com Gonçalves *et al.*<sup>(3)</sup>, os autores explanaram que as propriedades das argamassas produzidas com agregados artificiais britados por impacto apresentam o potencial de possuir resistência superior e absorção inferior que argamassas produzidas por agregados naturais. Contudo, necessita-se de minuciosas avaliações físicas, mecânicas e mineralógicas do agregado para se obter melhores constatações sobre sua influência nas propriedades da argamassa.

Sabe-se que quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade da matriz e menor a resistência mecânica, desta forma, o resultado do ensaio de consistência em relação a resistência à compressão axial é um indicativo que a maior relação água/cimento, obtida pela (AAL) influenciou na menor resistência à compressão axial da argamassa.

A baixa absorção de água da argamassa produzida com a composição dos três agregados (AC2) reforça a hipótese que o ajuste dos agregados nos limites ótimos da NBR 7211<sup>(8)</sup> melhora o empacotamento das partículas. Entretanto, essa influência não foi efetiva no comportamento mecânico, não obtendo resistência superior à argamassa produzida por um dos agregado natural (AAB).

A argamassa produzida apenas com a composição dos agregados naturais (AC1) apresentou maior absorção de água quando comparado com a AC2, convergindo com a análise granulométrica, onde a composição C1 está menos adequada aos limites da zona ótima da NBR 7211<sup>(8)</sup>, indicando um menor empacotamento das partículas. Análogo a AC2, a possível ação do empacotamento de partícula também não foi significativamente efetiva no desempenho mecânico dessa argamassa.

#### 4. CONSLUSÕES

A proposta do presente trabalho consistiu em avaliar a influência da areia de britagem e dos agregados compostos conforme os limites da NBR 7211<sup>(8)</sup> nas propriedades das argamassas. Com os resultados dos ensaios realizados neste trabalho, pode-se concluir que:

A areia de britagem proporcionou melhor desempenho mecânico e menor absorção de água nas argamassas, quando comparadas com as argamassas produzidas por agregados naturais. Entretanto, ainda existe carência na compreensão das propriedades deste agregado.



A argamassa produzida com a composição dos três agregados apresentou menor consumo de água e reduzida absorção de água, indicando a ação de empacotamento das partículas, entretanto o desempenho mecânico não foi relevantemente influenciado.

A argamassa produzida com a composição apenas dos agregados naturais também apresentou reduzido consumo de água, entretanto, a possível ação do empacotamento de partícula não foi significativamente efetiva nas propriedades da argamassa, ressaltando-se que esta composição encontra-se parcialmente nos limites da NBR 7211<sup>(8)</sup>.

Haja visto que a areia de britagem é um subproduto da produção da brita, evidencia-se a possibilidade da utilização deste agregado em argamassa, bem como a utilização em associação com agregados naturais.

## 5. REFERÊNCIAS

1. BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). LIMA, T. M., NEVES, C. A. R. (Coord.). **Sumário Mineral**. 135p. Brasília, 2016.
2. SBRIGHI NETO. Agregados para Concreto. In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.
3. GONÇALVES, J. P.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; CUNHA, E. R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, 37(6), 924-932, 2007.
4. ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540-548, 2014.
5. ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 179-186, 2015.
6. AMENTA, M.; KARATASIOS, I.; MARAVELAKI-KALAITZAKI, P.; KILIKOGLU, V. The role of aggregate characteristics on the performance optimization of high hydraulicity restoration mortars. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 527-534, 2017.
7. ROMANO, R. C. O.; TORRES, D. R.; PILEGGI, R. G. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. **Construction And Building Materials**, v. 82, p.219-226, 2015.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
9. LOBO CARNEIRO, F. L. B. Dosagem de Concreto. Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 1953.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.



11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
13. SILVA, N. G. **Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Curitiba. 164 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, 2006.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2005.
15. FUNK, James E.; DINGER, Dennis R. Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing. **Springer Science & Business Media**, 2013.



# AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO NATURAL NA PRODUÇÃO DE CONCRETO ESTRUTURAL

**Maria Francielle Santos Menezes <sup>(1)</sup>; Angela Teresa Costa Sales <sup>(2)</sup>**

(1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Sergipe – franci.menezes@gmail.com; (2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Sergipe – angelasales19@gmail.com

## RESUMO

A grande maioria das atividades humanas causa numerosos impactos ao meio ambiente. Sem dúvida, um dos setores econômicos mais impactantes, em termos de impactos ambientais, é a Construção Civil, visto que gera uma quantidade exorbitante de resíduos. Tem-se buscado alternativas mais sustentáveis nesse setor, como forma de diminuir as interferências danosas ao meio ambiente. Dentre essas alternativas, destaca-se a reciclagem de resíduos da Construção Civil, visando à produção de materiais reciclados, dentro do próprio setor. Esse estudo teve como objetivo a produção de concretos estruturais, utilizando-se agregados graúdos obtidos de resíduos de concretos estruturais. Utilizaram-se somente agregados de resíduos de concretos, provenientes da britagem de corpos de prova. Foram produzidos concretos com agregados graúdos reciclados com teores de substituição de 30% (CRC30) e 50% (CRC50), além do concreto de referência (REFER), esse somente com agregados naturais. Visando a avaliar a influência do uso do agregado reciclado nas propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido, foram realizados ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral, aos 28 dias. Os resultados mostraram a viabilidade do uso de agregados oriundos dos resíduos na produção de concretos, podendo ser fabricados concretos com fins estruturais.

**Palavras-chave:** resíduos de construção, agregado reciclado de concreto, concreto estrutural.

## CONCRETE RECYCLED AGGREGATE SUBSTITUING NATURAL AGGREGATE TO PRODUCE STRUCTURAL CONCRETE

### ABSTRACT

The vast majority of human activities cause numerous impacts on the environment. Undoubtedly, one of the most power environmentally impactful economic sectors is the Civil Construction, as it generates an exorbitant amount of waste. Alternative sustainable practices are sought, as a means of reducing harmful interference to the environment. Among these alternatives, it is worth highlighting the recycling of construction waste for use within the sector itself. The present study had the objective of producing concrete with the use of recycled aggregates for structural purposes. Recycled aggregates of concrete residues from crushed specimens were used. Concretes were produced with recycled aggregates with 30% (CRC30) and 50% (CRC50) substitution contents, besides the reference concrete (REFER), with only natural aggregates. It was aimed to evaluate the influence of the use of the recycled aggregate on the mechanical properties of the hardened concrete. Axial compression and indirect tensile tests were carried after 28 days of cure. The tests results showed the feasibility of the use of good recycled aggregates, as these residues, in the production of concretos with structural mechanical performance.

**Keywords:** construction waste, concrete recycled aggregate, structural concrete.



## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, o ser humano explorou a natureza de forma inadequada, partindo da premissa de que os recursos naturais seriam ilimitados. Contudo, com o passar dos anos, percebeu-se que esse modelo de desenvolvimento adotado, pautado na exploração exacerbada da natureza, ia de encontro à capacidade de regeneração do planeta. Esse modelo de desenvolvimento implicou o aumento da geração de resíduos, exaurindo as reservas minerais, contaminando o meio ambiente e prejudicando a saúde humana <sup>(1)</sup>.

Dentre os resíduos sólidos (RS) gerados, verifica-se que os resíduos de construção e demolição (RCD) compõem uma parcela expressiva do total de RS produzidos. A exploração de recursos naturais para uso no setor da Construção Civil tem como consequência a geração de toneladas de RCDs todos os anos <sup>(2)</sup>.

Ao contrário dos outros países, a legislação brasileira acerca do gerenciamento de resíduos ainda é muito recente. Somente em 2002, entrou em vigor a Resolução CONAMA n° 307 <sup>(3)</sup>, que trata de procedimentos para a gestão de RCD e, apenas em 2010, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) <sup>(4)</sup>. Em virtude disso, o manejo dos resíduos ainda ocorre de forma inadequada, o que implica problemas de ordem econômica, social e principalmente ambiental <sup>(5)</sup>.

Nesse cenário de agressões propiciado pela Construção Civil, uma das formas encontradas para dirimir esses problemas é a reciclagem dos RCDs para utilização no próprio setor econômico, na produção de concretos, argamassas, dentre outros. Vários pesquisadores já estudaram o emprego de agregados reciclados e os resultados obtidos mostraram a viabilidade do uso <sup>(6)</sup> <sup>(7)</sup> <sup>(8)</sup>, mesmo para concretos estruturais <sup>(9)</sup> e para concretos de alto desempenho <sup>(10)</sup>.

Dentre os inúmeros benefícios advindos do uso de RCD, pode-se citar a redução da disposição de resíduos em aterros, a diminuição da exploração de recursos naturais, a redução dos custos de gerenciamento do resíduo, dentre outros <sup>(11)</sup>. No entanto, existem limitações para a expansão da utilização dos agregados provenientes de RCD, como a heterogeneidade de seus constituintes e a possibilidade de contaminação <sup>(6)</sup>.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da substituição de parte do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de concreto para a produção de concretos com finalidade estrutural.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização dos materiais

O cimento utilizado foi o CP II Z 32 – RS (cimento Portland composto com pozolana, resistente a sulfato), da marca Nacional. De acordo com o fabricante, esse tipo de cimento proporciona a produção de um concreto com pega mais rápida e com coloração escura.

O agregado miúdo empregado foi uma areia de barranco, encontrável no mercado local no município de São Cristóvão, Sergipe, com diâmetro máximo ( $d_{máx}$ ) de 2,4 mm (areia grossa) e módulo de finura (MF) de 2,61, ambas as propriedades determinadas de acordo com as recomendações da NBR NM 248 <sup>(12)</sup>. A massa específica real foi de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e a massa unitária foi igual a 1,48 g/cm<sup>3</sup>, determinadas respectivamente pela NBR 9776 <sup>(13)</sup> e pela NBR NM 45 <sup>(14)</sup>.

O agregado graúdo natural utilizado no trabalho foi composto por brita 0 e por brita 1, assim denominadas localmente. Tanto a brita 0 quanto a brita 1 apresentaram massas específicas reais de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, determinadas segundo a NBR NM 53 <sup>(15)</sup>. Já o  $d_{máx}$  e o MF foram determinados pela NBR NM 248 <sup>(12)</sup>. O  $d_{máx}$  de ambas foi igual a 12,5 mm. O MF da brita 0 foi igual a 5,73 e o da brita 1 foi de 6,52.

O agregado graúdo reciclado, por sua vez, foi proveniente da trituração de pedaços de corpos de prova de concretos (CPs) rompidos em testes de trabalhos de pesquisas anteriores. Os fragmentos de concreto eram mantidos no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) da Universidade Federal de Sergipe (UFS). Os fragmentos foram selecionados de concretos dosados para  $f_{ck}$  de 30 MPa. O agregado reciclado foi correspondente a uma brita 1. Para o processo de britagem dos pedaços de CPs utilizou-se um britador de mandíbulas do citado laboratório.

Para a determinação da granulometria do agregado reciclado, a amostra triturada foi disposta em uma superfície plana e posteriormente foi quarteada (Figura 1), conforme a norma NBR 10007 <sup>(16)</sup>. A determinação da composição granulométrica foi obtida segundo o método da norma NBR NM 248 <sup>(12)</sup>.

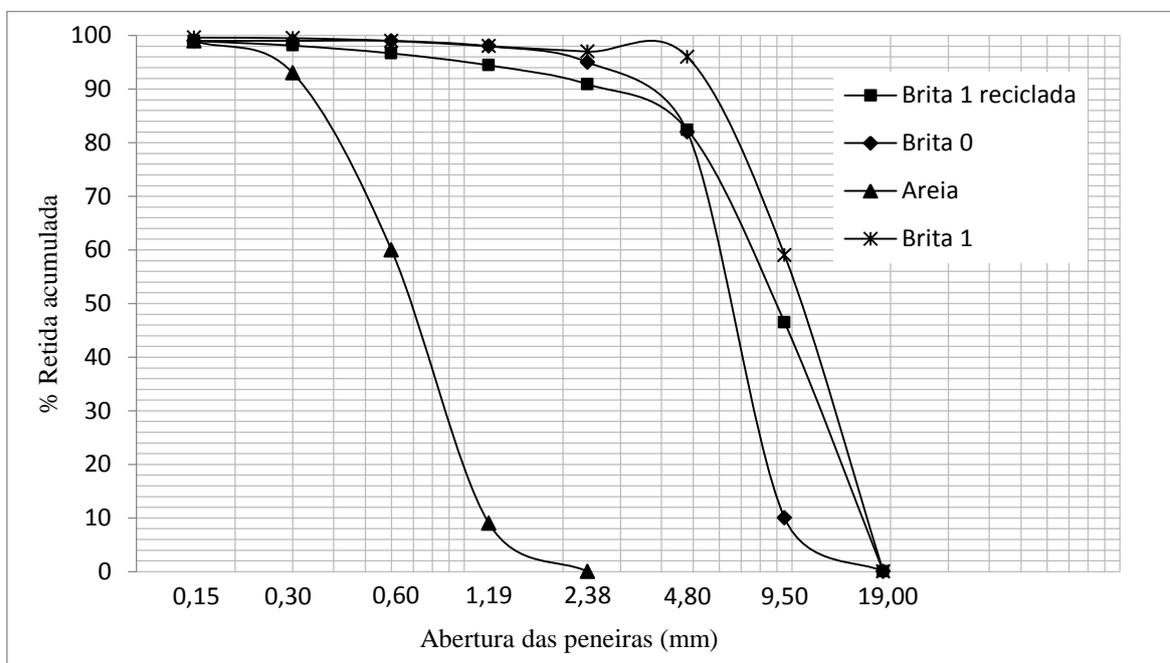


Figura 1 - Amostra quarteada.



O diâmetro máximo ( $d_{m\acute{a}x}$ ) do agregado graúdo reciclado obtido foi de 19 mm e o MF resultou em 6,08. Foram determinadas a massa específica do agregado reciclado seco, resultando no valor de 2,42 g/cm<sup>3</sup>, e a absorção de água do agregado reciclado, que resultou em 4,3%, ambas determinadas de acordo com a norma NBR NM 53 <sup>(15)</sup>. A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados utilizados.

Figura 2 - Curva granulométrica dos agregados.



Foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento, como água de amassamento e para a pré-molhagem dos agregados reciclados.



Utilizou-se o aditivo redutor de água da linha MIRA CR 74, da marca *Grace Construction*. O uso do aditivo foi necessário em virtude da baixa trabalhabilidade dos concretos produzidos. A quantidade utilizada manteve-se dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

## 2.1. Métodos

Foram produzidos concretos com dois teores de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado. No primeiro, houve a substituição de 50% de brita 1 natural por brita 1 reciclada (CRC50). O segundo teve 30% de substituição da brita 1 natural por brita 1 reciclada (CRC30). Foi também produzida a mistura de referência (REFER), confeccionada exclusivamente com agregados naturais, para comparação de desempenho com os concretos com agregados reciclados.

O método de dosagem utilizado, para os três concretos, foi o do Instituto Nacional de Tecnologia do Rio de Janeiro (INT-RJ), idealizado por Lobo Carneiro <sup>(17)</sup>. Como o intuito era a produção de concretos com finalidade estrutural, foi adotada uma resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa. Para todas as misturas, foi fixada a relação água/cimento de 0,45. O traço em massa inicial, determinado pelo método de dosagem citado, foi igual a 1:1,25:1,40:1,97 (cimento : areia : brita 0 : brita 1), com um consumo de cimento de 397 kg/m<sup>3</sup>.

Conforme as recomendações da NBR 15116<sup>(18)</sup>, efetuou-se a pré-molhagem do agregado reciclado, com um volume de água equivalente a 80% da taxa de absorção do material, que foi igual a 4,3%, aguardando-se 10 minutos, antes de sua colocação na betoneira para a mistura.

No laboratório, foram realizados os ajustes dos traços, visando à uniformização das consistências dos concretos. Após a produção das misturas, foram determinados os abatimentos de tronco de cone de cada uma delas, resultando em valores no intervalo de 2 cm  $\pm$  1 cm. Como de acordo com a NBR NM 67<sup>(19)</sup>, esse método é aplicável aos concretos com assentamento igual ou superior a 10 mm, decidiu-se utilizar esse valor de abatimento, apesar de ser baixo.

Os traços dos concretos, os consumos de cimento, as relações água/cimento, os teores de aditivo e os abatimentos para os três concretos encontram-se na Tabela 1.



Tabela 1 - Características das três misturas produzidas.

Concreto	Traço em massa inicial	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Relação água/cimento	Teor de aditivo	Abatimento do tronco de cone
CRC30	1:2,01:2,01:0,86	378	0,45	1,12%	2 cm ±1 cm
CRC50	1:1,78:1,26:1,61	387	0,45	0,85%	2 cm ±1 cm
REFER	1:1,93:1,93:0,82	394	0,45	-	2 cm ±1 cm

Foram produzidos nove corpos de prova para cada mistura, sendo cinco deles para ensaios de resistência à compressão e quatro para ensaios de resistência à tração por compressão diametral. É importante destacar que o adensamento de cada mistura foi realizado de forma manual.

Os ensaios de compressão axial do concreto seguiram as recomendações da norma NBR 5739 <sup>(20)</sup> e foram executados na máquina universal de ensaios, modelo DL 20000, marca EMIC, com o uso da prensa de compressão PCE 100. Já os ensaios de tração por compressão diametral do concreto seguiram as recomendações da norma NBR 7222 <sup>(21)</sup> e foram executados na máquina universal de ensaios, modelo DL 20000, marca EMIC.

Em virtude de os agregados reciclados possuírem menores massas específicas, observou-se que, se fosse utilizada a massa de brita 1 reciclada conforme calculada, o volume do concreto produzido seria superior ao de um concreto feito somente com agregados naturais (concreto de referência). Por conta disso, realizou-se uma compensação do volume dos agregados reciclados <sup>(6)</sup>. Portanto, foi realizada uma substituição em massa, com compensação do volume.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

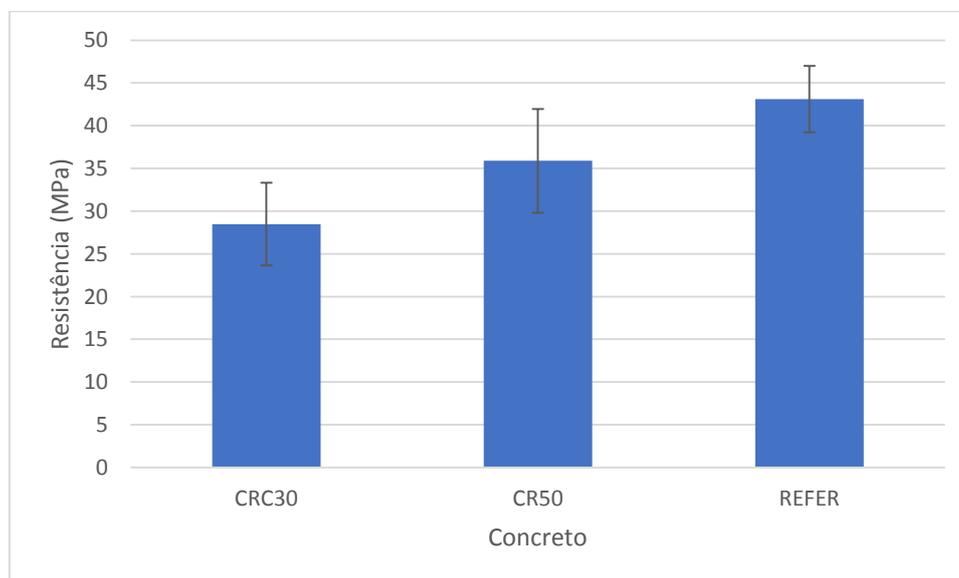
#### 3.1 Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão axial obtidos dos ensaios estão mostrados na Tabela 2 e na Figura 3.

Tabela 2 - Resistência à compressão dos concretos ensaiados.

Concreto	Resistência à compressão axial (MPa)	CV (%)
CRC30	28,49	16,99
CRC50	35,89	16,96
REFER	43,11	9,02

Figura 3 - Resistência à compressão dos concretos.



Os concretos com agregados reciclados apresentaram menores valores de resistência média à compressão, em comparação com a mistura de referência. Para o CRC50, houve uma redução da resistência de 16,75%, em relação ao valor de resistência para o concreto de referência. Mesmo assim, o valor da resistência média do CRC50 foi superior à resistência para a qual foi dosado ( $f_{ck} = 30$  MPa). Para o concreto CRC30, a redução da resistência foi de 33,91% em comparação com a



resistência do concreto REFER. A resistência média obtida ficou próxima à resistência para a qual foi dosado ( $f_{ck} = 30$  MPa).

Ressalta-se que o concreto CRC50, apesar de conter um maior teor de agregado reciclado, em comparação com o concreto CRC30, a resistência média à compressão apresentada pelo primeiro foi superior à do segundo. Pode-se supor que, no concreto CRC50, havendo um teor maior de cimento na mistura e ainda mais baixa relação água/cimento, houve o alcance de maior resistência à compressão, em relação ao concreto CRC30.

A despeito da diminuição da resistência média à compressão apresentada pelos concretos com agregados reciclados, em comparação com o concreto de referência, os valores obtidos mostraram que os concretos com agregados reciclados de resíduos de concreto poderiam ser utilizados com finalidade estrutural, alcançando valores de resistência bem maiores que o valor limite de 20 MPa, podendo ser considerados como concreto estrutural <sup>(22)</sup>.

### 3.2 Resistência à tração por compressão diametral

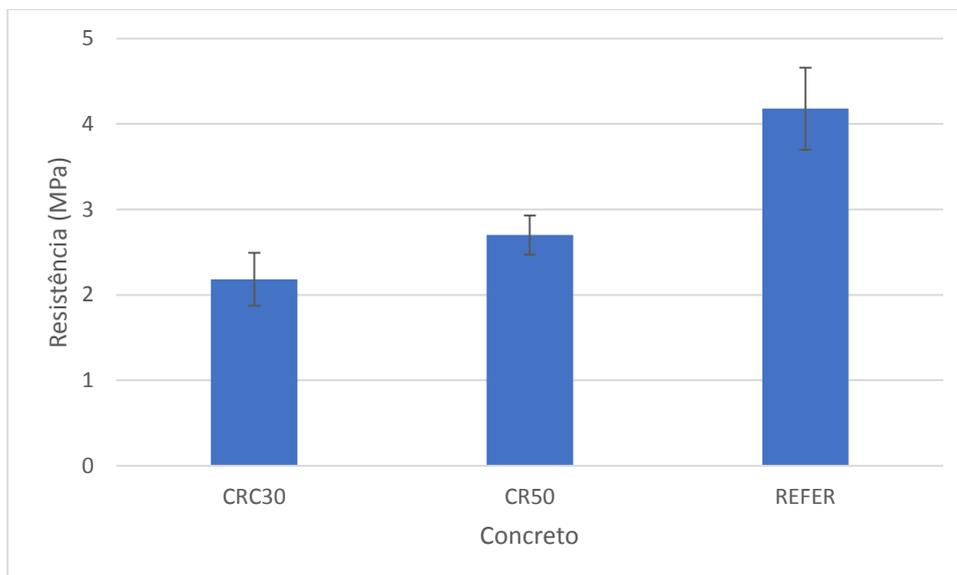
Os valores de resistência à tração por compressão diametral, obtidos com os ensaios, estão mostrados na Tabela 3 e na Figura 4.

Tabela 3 - Resistência à tração dos concretos ensaiados.

Concreto	Resistência à tração (MPa)	CV (%)
CRC30	2,18	14,22
CRC50	2,70	8,52
REFER	4,18	11,48



Figura 4 - Resistência à tração dos concretos.



Os concretos com agregados reciclados apresentaram menores valores de resistência à tração, em comparação com a do REFER. Para o CRC50, houve uma redução da resistência de 35,41%, em relação ao valor da resistência média encontrada para o REFER. No caso do CRC30, a redução da resistência foi 47,85%, em comparação ao REFER. Os valores obtidos para a resistência à tração para os três tipos de concreto foram da ordem de 7% a 10% da resistência à compressão, ficando dentro da faixa preconizada <sup>(23)</sup>.

Vale frisar que para a determinação da resistência à tração média do REFER, foram utilizados apenas três CPs, visto que um deles encontrava-se úmido na ocasião do ensaio, resultando em um valor de resistência à tração muito aquém dos valores obtidos com os outros CPs.



## 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com os ensaios realizados permitiram concluir que o uso de agregados reciclados de concreto em substituição aos agregados naturais é possível, mesmo para concretos com finalidade estrutural. É importante ressaltar que os agregados reciclados, oriundos de fragmentos de CPs, foram caracterizados quanto às propriedades físicas antes de serem utilizados na produção do concreto.

Com relação às propriedades mecânicas, os resultados obtidos indicaram a possibilidade da utilização desse modo de produção de concretos alternativos. A resistência à compressão do REFER foi igual a 43,11 MPa, a do CRC50 resultou em 35,89 MPa (83,25% da resistência do REFER) e a do CRC30 foi de 28,49 MPa (66,09% da apresentada pelo REFER).

Por sua vez, a resistência média à tração por compressão diametral do concreto REFER foi igual a 4,18 MPa, a do CRC50 foi de 2,70 MPa (64,59% da apresentada pelo REFER) e a do CRC30 foi igual a 2,18 MPa (52,15% da resistência do REFER). Os valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral ficaram no intervalo de 7% a 10% da resistência à compressão dos concretos, portanto dentro da faixa preconizada <sup>(23)</sup>.

Como limitação do trabalho, tem-se o fato de que tanto no ensaio de resistência à compressão quanto no de resistência à tração por compressão diametral, os coeficientes de variação resultaram em valores altos, por causa das dificuldades na moldagem em função da baixa trabalhabilidade das misturas.

Apesar da redução considerável da resistência dos concretos produzidos com agregados reciclados em comparação com o REFER e da norma NBR 15116 <sup>(18)</sup> não recomendar a produção de concretos estruturais com agregados reciclados, os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram resistências à compressão superiores a 20 MPa, podendo ser classificados como estruturais <sup>(22)</sup>.

Sugere-se que em trabalhos futuros sejam avaliadas outras características dos concretos, como módulo de elasticidade, absorção de água, massa específica e índice de vazios, que irão contribuir para analisar de forma mais satisfatória a viabilidade do uso de agregados reciclados para concretos estruturais.



## 5. REFERÊNCIAS

1. MORAIS, G. M. D. M. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia: subsídios para uma gestão sustentável.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia: 2006.
2. SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.
3. BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002.
4. \_\_\_\_\_. **Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.
5. SILVA, V. A.; FERNANDES, A. L. T. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. Uberaba: **Sociedade & Natureza**, ano 24, n.2, 333-334, mai/ago, 2012.
6. CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos: 2007.
7. PETRY, N. dos S. et al. Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 6, n. 2, p. 71-92, 2017.
8. SANTOS, S. B. J. S. dos et al. Utilização de resíduos de corpos de prova em substituição do agregado graúdo de concretos. **Revista Interscientia**, v. 4, n. 2, p. 137-151, 2016.
9. CALDEIRA, A. C. V., SERRADILHA, V. H.; RODRIGUES, P. S. H. Utilização de resíduo de bloco estrutural de concreto na substituição parcial e total de agregados e aglomerantes em traço de concreto estrutural. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Araçatuba, SP, v. 1, n. 1, p. 72-88, 2016.
10. BARBOSA, M. de S. et al. Produção de concreto de alto desempenho (CAD) com adição de pó de pedra. **Revista Interscientia**, v. 7, n. 1, p. 200-217, 2019.
11. BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 62, p. 278-189, 2015.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
13. \_\_\_\_\_. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.
14. \_\_\_\_\_. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
15. \_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.



16. \_\_\_\_\_. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
17. PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 2005.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
19. \_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
21. \_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
23. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.



## ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM AGREGADO DE RCD

Lima, R. S. B. <sup>(1)</sup>; Tavares, M. E. N. <sup>(2)</sup>; Bento, R. S. <sup>(3)</sup>

(1) UERJ – renan.sbdelima@gmail.com; (2) UERJ – etavares@uerj.br; (3) UERJ – Rayza.bento@gmail.com

### RESUMO

O presente trabalho trata da análise do comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado que utilizam agregados provenientes do beneficiamento de corpos de prova de concreto com resistência característica conhecida de 35 MPa. Foram confeccionados diferentes tipos de concreto, sendo um de referência contendo agregados convencionais e outros contendo substituições de agregados convencionais por agregados reciclados de RCD de diferentes classes e teores de substituição. Com essas diferentes misturas de concreto fabricou-se corpos de prova cilíndricos e prismáticos que foram usados na determinação das propriedades mecânicas do concreto, além de vigas de concreto armado. As vigas possuem seção de 0,15m x 0,30m com vão livre de 1,4m e sua instrumentação foi realizada com base em extensômetros localizados nas armaduras e no concreto, aliado ao uso de deflectômetros em sua face inferior. Esses elementos foram submetidos ao ensaio de flexão simples. Com base nas análises dos resultados, considera-se que as vigas contendo agregados reciclados possuem ligeira inferioridade na resistência ao esforço cortante quando comparadas à viga referência. Por outro lado, como a redução de desempenho das vigas de RCD é pequena e as cargas de ruptura alcançadas por todas as vigas são próximas entre si, conclui-se que o uso de agregados reciclados de RCD nesses elementos estruturais é tecnicamente viável.

**Palavras-chave:** Resíduo de construção e demolição, concreto reciclado, cisalhamento em vigas.

## EXPERIMENTAL STUDY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH AGGREGATE OF RCD

### ABSTRACT

The present work deals with the analysis of the shear behavior of reinforced concrete beams using recycled aggregates from concrete specimens with a known characteristic strength of 35 MPa. Different types of concrete were made, one being a reference that contains conventional aggregates and others containing conventional aggregate replacement by recycled CDW aggregates of different classes and substitution levels. With these different concrete mixtures, cylindrical and prismatic specimens were fabricated and used to determine the mechanical properties of concrete, as well as reinforced concrete beams. The beams have a 0.15m x 0.30m section with a free span of 1.4m and their instrumentation was performed based on strain gages located in the reinforcement and concrete, in addition to the use of transducers on their underside. These elements were submitted to the simple bending test. Based on the analysis of the results, it is considered that the beams containing recycled aggregates have a slight inferiority in shear strength when compared to the reference beam. On the other hand, as the performance reduction of the CDW beams is small and the resistance achieved by all the beams are close to each other, it is concluded that the use of recycled CDW aggregates in these structural elements is technically feasible.

**Key-words** Construction and demolition waste, recycled concrete, shearing in beams.



## 1. INTRODUÇÃO

Praticamente todas as atividades desenvolvidas na construção civil são geradoras de resíduos, comumente chamados de entulho ou resíduo de construção e demolição (RCD). Segundo PINTO (1999)<sup>(1)</sup>, em cidades brasileiras de médio e grande porte, o RCD constitui de 40% a 70% de todos os resíduos sólidos nas cidades brasileiras.

Graças ao conceito de sustentabilidade, o modo o qual o resíduo da construção civil (RCC) vinha sendo tratado está se modificando. Esse resíduo deixou de ser um material descartado e agora está sendo reinserido no ciclo produtivo. Na construção civil, parte integrante do desenvolvimento sustentável é o gerenciamento do RCD.

Uma alternativa inteligente para a diminuição da quantidade desses resíduos é a reciclagem dos mesmos. Essa prática permite reduzir o impacto ambiental, minimizar a extração de recursos minerais e diminuir a poluição gerada pela indústria da construção civil.

Considerando a necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelo RCD, é proposto neste artigo o beneficiamento do resíduo Classe A (resolução 307, CONAMA<sup>(2)</sup>) por meio da reciclagem de corpos de prova de concreto com procedência conhecida em agregados graúdos e miúdos. Os agregados reciclados foram utilizados na confecção de novos concretos (mistos), ou seja, concretos com diferentes percentagens de agregados convencionais e reciclados.

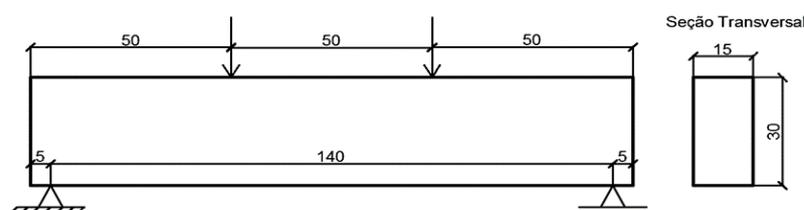


## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Pré-dimensionamento

A seguir é apresentado em croqui a disposição da carga na viga bi-apoiada, além das dimensões de interesse em centímetros.

Figura 1 – Dimensões de interesse da viga



Como a finalidade do trabalho é o estudo do efeito do cisalhamento em concretos com RCD, os estribos foram utilizados com afastamento superior ao calculado pela NBR6118:2014. Por essa norma, seriam necessários 20 estribos de 6,3 mm de bitola com espaçamento de 7,5 cm. A armadura longitudinal foi dimensionada como preconiza essa mesma norma, a partir de uma carga a ser suportada pela viga com deformações de seção transversal pertencentes ao domínio 3. O dimensionamento foi feito para que a carga suportada pela viga fosse maior que o esforço cisalhante na seção, garantindo que esse elemento estrutural não rompesse devido a tensões normais. A Tabela 1 apresenta as taxas de armadura de flexão e cisalhamento das vigas.

Tabela 1 – Resumo da geometria e armadura das vigas

bw (cm)	h (cm)	Armadura longitudinal (mm)	As total (cm <sup>2</sup> )	Armadura transversal (mm)	Asw total (cm <sup>2</sup> /m)
15	30	5 Ø 12,5	6,14	11 Ø 6,3 c. 12,5	4,99

### 2.2. Metodologia

Foram confeccionadas quatro vigas de seção 0,15m x 0,3m com 1,5m de comprimento, sendo cada uma composta por um tipo de concreto e cada tipo de contendo diferentes teores de agregado reciclado. Entre elas estão a viga/concreto referência, que é confeccionada com agregados naturais; viga/concreto 50% gráudo, confeccionada com substituição de 50% do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado de RCD; viga/concreto 35% gráudo, confeccionada com substituição de 35% do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado de RCD; viga/concreto 50% miúdo,



confeccionada com substituição de 50% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de RCD.

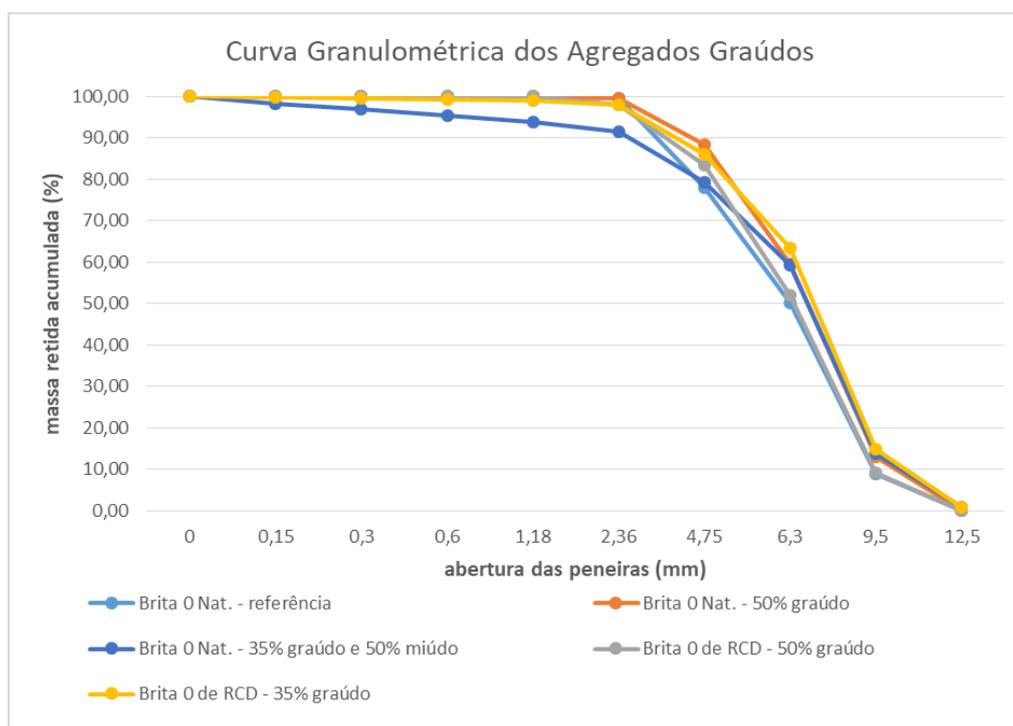
Os agregados reciclados de RCD são provenientes da reciclagem de corpos de prova com  $f_{ck}$  de 35 MPa. O beneficiamento dos corpos de prova em agregado foi feito através de máquina recicladora que promove por meio de duas mandíbulas o esmagamento do concreto, resultando em agregados reciclados de três diferentes granulometrias (areia, brita 0 e brita 1).

## 2.3. Ensaios de caracterização física dos agregados

### 2.3.1. Composição granulométrica

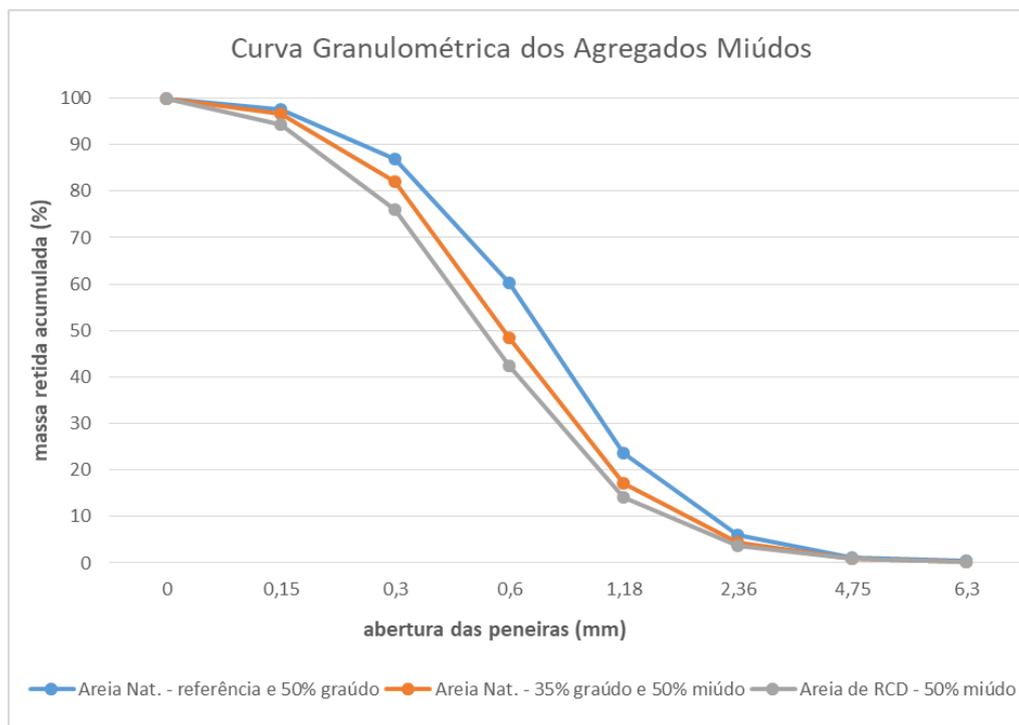
São apresentadas a seguir as curvas granulométricas dos agregados graúdos e miúdos. Percebe-se que o objetivo de compatibilizar a granulometria das diferentes fontes de agregado por meio de peneiramento foi alcançada.

Figura 2 – Curva granulométrica dos agregados graúdos





**Figura 3 – Curva granulométrica dos agregados miúdos**



### 2.3.2. Absorção de água

Como esperado, os agregados reciclados de RCD apresentaram absorção mais elevada de água do que os agregados naturais. Isso pode ser verificado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Índice de absorção de água dos agregados**

Agregados	Absorção (%)
Areia natural (referência e 50% graúdo)	0,2
Brita 0 natural (referência)	1,4
Brita 0 natural (50% graúdo)	1,4
Brita 0 de RCD (50% graúdo)	7,1
Areia natural (35% graúdo e 50% miúdo)	0,6
Areia de RCD (50% miúdo)	8,5
Brita 0 natural (35% graúdo e 50%miúdo)	1,7
Brita 0 de RCD (35% graúdo)	6,7



## 2.4. Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas das armaduras

### 2.4.1. Armaduras das vigas referência e 50% graúdo.

Os resultados dos ensaios de tração e dobramento das vigas referência e 50% graúdo estão expostos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Cargas, tensões de escoamento e ruptura das barras da armadura das vigas referência e 50% graúdo

Ø Nominal (mm)	Massa (g)	Comprimento (mm)	Massa nominal (Kg/m)	Área (mm <sup>2</sup> )	Py (kN)	Pu(kN)	fy (MPa)	fu (MPa)	fu/fy
6,0	92,2	378,0	0,244	31,07	20,40	24,15	656,5	773,3	1,2

12,5	381,5	400,0	0,954	121,50	71,26	85,83	586,5	706,4	1,2
------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-----

Tabela 4 – Alongamento, dobramento e classificação das armaduras das vigas referência e 50% graúdo

Ø Nominal (mm)	L <sub>0</sub> (mm)	L (mm)	Alongamento (%)	Dobramento	Classificação
6,0	60,0	65,0	8,33	Sem fissura	CA-60
12,5	130,0	152,6	17,38	Sem fissura	CA-50

### 2.4.2. Armadura das vigas 35% graúdo e 50% miúdo

Os resultados dos ensaios de tração e dobramento das vigas 35% graúdo e 50% miúdo são mostrados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Cargas, tensões de escoamento e ruptura das barras da armadura das vigas 35% graúdo e 50% miúdo

Ø Nominal (mm)	Massa (g)	Comprimento (mm)	Massa nominal (Kg/m)	Área (mm <sup>2</sup> )	Py (kN)	Pu(kN)	fy (MPa)	fu (MPa)	fu/fy
12,5	379,6	398,0	0,953	121,40	65,95	84,58	543,2	696,7	1,3



**Tabela 6 – Alongamento, dobramento e classificação das armaduras das vigas 35% graúdo e 50% miúdo**

Ø Nominal (mm)	L <sub>0</sub> (mm)	L (mm)	Alongamento (%)	Dobramento	Classificação
12,5	130,0	154,0	18,46	Sem fissura	CA-50

## 2.5. Concretagem e trabalhabilidade das misturas

A Tabela 7 apresenta o traço unitário usado como referência para confecção de 1m<sup>3</sup> de concreto.

**Tabela 7 – Traço unitário para 1m<sup>3</sup> de concreto**

Concreto	Cimento	Brita 0 Nat.	Brita 0 RCD	Areia Nat.	Areia RCD	a/c
Referência	1,00	1,71	0,00	1,75	0,00	0,35
50% Graúdo	1,00	0,85	0,85	1,75	0,00	0,35
35% Graúdo	1,00	0,60	1,11	1,75	0,00	0,35
50% Miúdo	1,00	1,71	0,00	0,87	0,87	0,35

Na concretagem, o cimento utilizado foi o CII-E32, enquanto o superplastificante foi o TEC FLOW 8000A. Com a finalidade de se obter uma análise de resultados mais precisa, foi feita a compatibilização da granulometria de todos os agregados. Dessa forma, todos os agregados (miúdos e graúdos) tiveram suas curvas granulométricas compatibilizadas entre si, isto é, tiveram em sua composição granulométrica grãos de aproximadamente mesmo tamanho em mesma quantidade.

A trabalhabilidade de todas as misturas foi determinada a partir do “slump test” e é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8 – Resultados dos “slumps”**

Concretos	1ª ou única betonada (cm)	2ª betonada (cm)
Referência	20	10
50% graúdo	6,5	8
35% graúdo	2	-
50% miúdo	4	-



Parte das concretagens foi realizada em 2 betonadas por conta das condições em que a betoneira se encontrava no dia da respectiva concretagem. Os “slumps” mais baixos nos concretos 35% graúdo e 50% miúdo são justificados por conta do superplastificante, por motivos não identificados, não terem tido o efeito esperado. Com isso, teve-se que adicionar maior teor de água para que fosse possível confeccionar esses concretos. Isso resultou em um fator a/c de 0,46 para o 35% graúdo e de 0,51 para o 50% miúdo

## 2.6. Instrumentação das vigas

A viga foi instrumentada antes da concretagem por 11 extensômetros no aço, após a concretagem com 8 extensômetros no concreto e antes do ensaio de flexão simples por 4 deflectômetros posicionados sob a face inferior da viga, sendo um analógico e três digitais. O deflectômetro analógico serviu de calibração para se ter certeza que o deflectômetro digital central estava aferindo o deslocamento corretamente. Os croquis a seguir apresentam o posicionamento de cada extensômetro ou deflectômetro.

Figura 4 – Disposição dos extensômetros nas armaduras

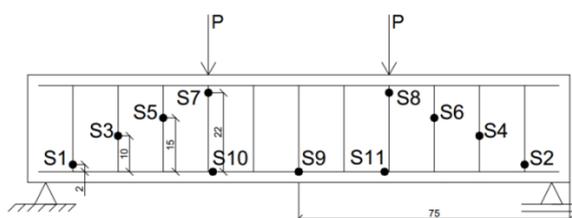


Figura 5 – Disposição dos extensômetros no concreto

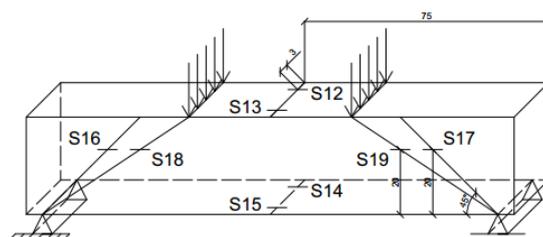
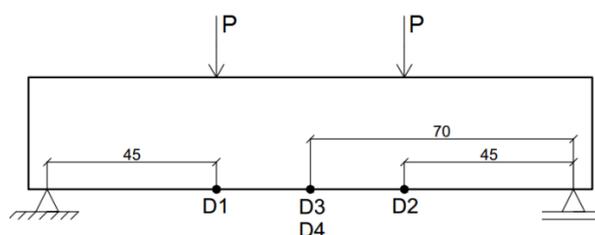


Figura 6 – Disposição dos deflectômetros sob a viga



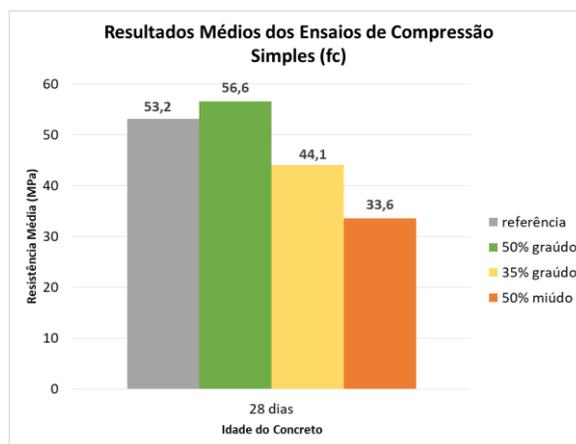


## 2.7. Ensaios de resistência mecânica dos corpos de prova

### 2.7.1. Ensaio de resistência à compressão axial

Na Figura 7 é apresentado o resultado para a compressão axial dos diferentes concretos para a idade de 28 dias.

Figura 7 – Resultado médio dos ensaios de compressão simples aos 28 dias



Os concretos confeccionados neste estudo apresentaram evolução da resistência à compressão simples coerentes em relação à idade do concreto, porém os concretos 35% graúdo e 50% miúdo comparados aos concretos referência e 50% graúdo tiveram resistência a compressão inferiores ao esperado. Isso ocorreu por conta do aumento do fator água cimento, especialmente no concreto 50% miúdo. Apesar desse fato, o concreto 35% graúdo apresentou resistência superior à teórica (40 MPa), chegando ao valor de 44,1 MPa com desvio padrão de 3,26 aos 28 dias.

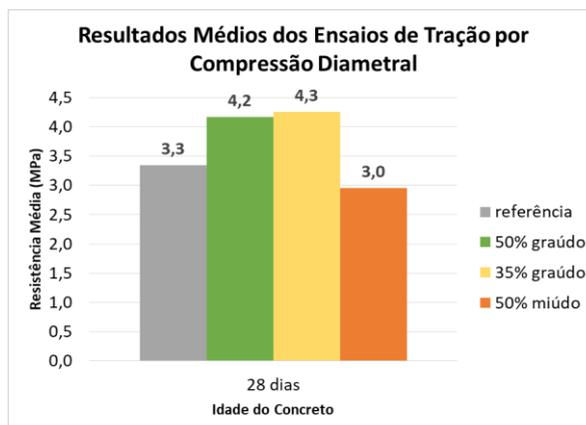
Um fator que pode explicar o valor de 33,6 MPa alcançado pelo concreto 50% miúdo, além da alteração do fator água cimento, é que estudos anteriores atestaram que a utilização de agregado miúdo reciclado parece afetar de forma significativa a resistência à compressão (LEITE, 2001)<sup>(4)</sup>. Pelos resultados obtidos é possível dizer que a influência do agregado graúdo reciclado é menos prejudicial ao concreto do que a influência do agregado miúdo reciclado.

### 2.7.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 8 são apresentados os resultados médios dos ensaios de tração por compressão diametral aos 28 dias de idade



Figura 8 – Resultados médios dos ensaios de tração por compressão diametral aos 28 dias

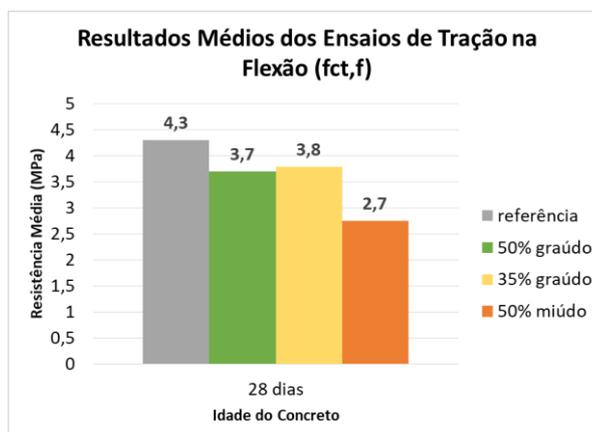


Quando analisada a resistência à tração por compressão diametral, os concretos obtiveram resultados ligeiramente inferiores (50% miúdo) e superiores (35% graúdo, 50% graúdo). Percebe-se que o agregado graúdo reciclado possui influência positiva no comportamento do concreto para esse parâmetro, pois todos os concretos confeccionados com esse tipo de agregado atingiram resistências superior às de referência.

### 2.7.3. Ensaio de resistência à tração na flexão

Na Figura 9 são apresentados os resultados dos ensaios de tração na flexão para idade de 28 dias.

Figura 9 – Resultados médios dos ensaios de tração na flexão aos 28 dias



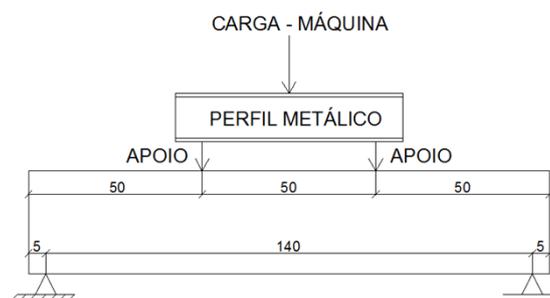
O resultado para tração na flexão mostra que os concretos compostos por agregados reciclados possuem resistência inferior aos concretos convencionais. Destaca-se o desempenho inferior do concreto 50% miúdo. No entanto, isso pode ter sido ocasionado pelo aumento no fator a/c, visto que DA CUNHA (2009)<sup>(5)</sup> constatou em seu estudo que concretos com substituição de 35% de agregado miúdo por agregado miúdo de RCD e 75% de agregado miúdo por agregado miúdo de RCD obtiveram resultados próximos aos de referência para resistência à tração na flexão.



## 2.8. Ensaio de flexão simples

A transmissão da carga da máquina para a viga foi realizada por meio de um perfil metálico com massa de 29,6 kg que estava sobre outros dois apoios de 2 kg cada posicionados sobre a viga. A figura a seguir apresenta um croqui do carregamento do ensaio de flexão normal simples.

Figura 10 – Esquema de carregamento da viga



### 2.8.1. Fissuração

A verificação da fissuração ocorreu de forma visual. A tabela a seguir apresenta as cargas as quais foram registradas o início da fissuração e o momento de fissuração correspondente.

Tabela 9 – Carga e momento de fissuração das vigas

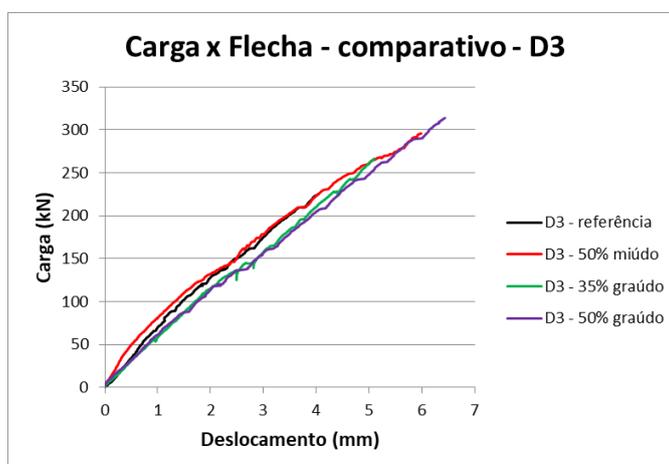
Viga	Carga de fissuração (kN)	Momento de fissuração	
		Ensaio (kN.m)	teórico (kN.m)
Referência	65,7	15,1	10,15
50% Graúdo	57,9	13,3	8,74
35% Graúdo	48,9	11,4	9,98
50% Miúdo	50,0	11,7	6,38

### 2.8.2. Deslocamentos (flechas)

Analisando o deslocamento das vigas no gráfico da Figura 11 a seguir, percebe-se um comportamento global muito similar entre esses elementos estruturais. As vigas compostas por teores de agregado graúdo possuem flechas maiores que a viga referência. Destaca-se o comportamento da viga 50% miúdo. Ela apresentou a curva de deslocamento quase que sobreposta à viga referência, porém para cargas mais altas ela obteve maiores deslocamentos.



Figura 11 – Gráfico Carga x Flecha de D3 (localizado no centro da viga)



### 2.8.3. Cargas de ruptura

As vigas foram dimensionadas para suportar um momento de 74,84 kN.m. A tabela 10 apresenta as cargas e momentos na ruptura das vigas.

Tabela 10 – Cargas de ruptura das vigas

Viga	Carga de ruptura (kN)	Momento último (kN.m)
Referência	370,5	83,6
50% Graúdo	373,9	84,4
35% Graúdo	393,9	88,8
50% Miúdo	331,4	74,8

Todas as vigas, com exceção da 50% miúdo, tiveram cargas de ruptura altas e próximas entre si. A viga 50% miúdo apresentou carga última menor, porém seu modo de ruptura foi por conta do deslizamento da armadura longitudinal no apoio. Destaca-se o resultado obtido pela viga 35% graúdo, que apresentou maior carga de ruptura com valor de 393,9 kN. A ruptura dessa viga ocorreu devido ao cisalhamento, tendo como causa o rompimento do estribo. As vigas de referência e 50% graúdo tiveram como causa da ruptura o esmagamento do concreto.

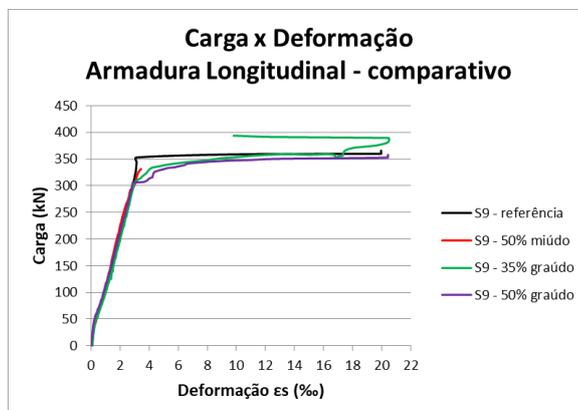
### 2.8.4. Deformações no aço

Como o número de extensômetros é muito grande, serão selecionados alguns localizados em regiões de interesse para a análise de resultados.



### 2.8.4.1. Extensômetro S9 no meio do vão da armadura longitudinal

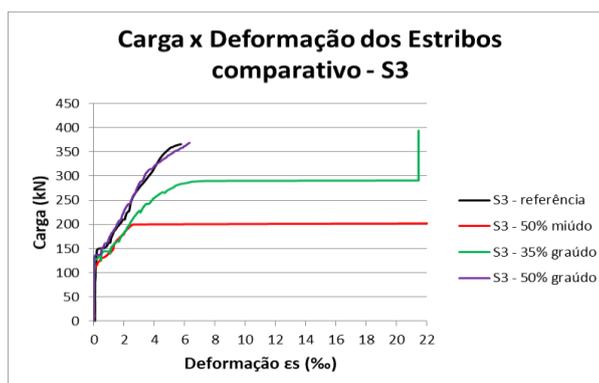
Figura 12 – Gráfico Carga x Deformação de S9 (localizado no centro da armadura longitudinal)



Analisando-se o gráfico pode-se concluir que as 4 vigas mostram comportamento idêntico até a carga de 300 kN. As vigas com substituição de agregado graúdo apresentaram início do escoamento para a mesma carga (304 kN) e deformação (2,6‰ - 2,8‰), porém a viga 50% graúdo teve um patamar de escoamento melhor definido. As cargas finais atingidas pelas armaduras já escoadas foram muito próximas, sendo 351,08 kN para a viga 50% graúdo e 358,15 kN para as vigas referência e 35% graúdo.

### 2.8.4.2. Extensômetros localizados na armadura transversal

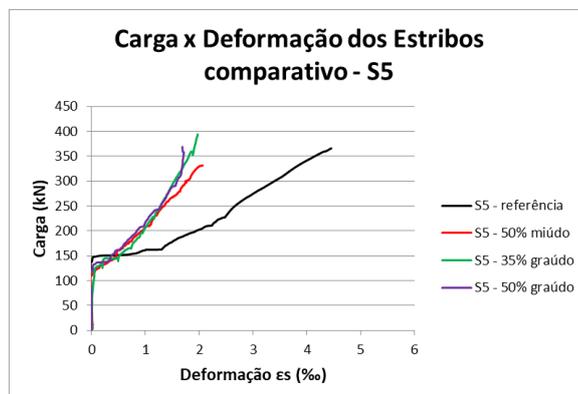
Figura 13 – Carga x Deformação de S3 (localizado no estribo das vigas)



Como S3 é o extensômetro mais próximo do centro da seção, o mesmo apresenta maior deformação. Segundo o diagrama de tensões cisalhantes, é à meia altura em que a tensão cisalhante obtém seu valor máximo e onde as tensões principais estão inclinadas em 45°. No gráfico de S3 as curvas de todas as vigas tiveram comportamento semelhantes até a carga próxima de 130 kN. Após essa carga, as vigas 35% graúdo e 50% miúdo apresentaram evolução mais rápida de deformações resultando em maiores deformações finais.



Figura 14 – Carga x Deformação de S5 (localizado no estribo das vigas)



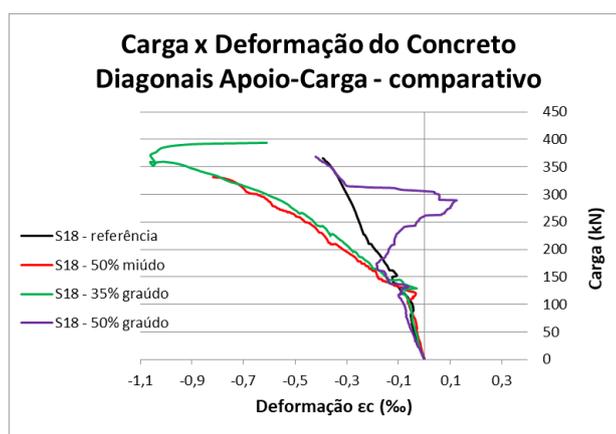
No gráfico de S5, todas as vigas que utilizam RCD em sua composição apresentaram deformações muito próximas entre si e menores que as deformações da viga referência ao longo de todo o carregamento. Isso pode indicar uma perda de ductilidade da viga por conta do uso dos agregados de RCD

Em uma análise global dos gráficos de deformações nos estribos, pode se perceber uma grande variabilidade de qual viga possui maior ou menor deformação quando analisados os extensômetros simétricos e as diferentes posições dos extensômetros.

## 2.8.5. Deformações no concreto

### 2.8.5.1. Extensômetro S18 localizado na diagonal apoio-carga

Figura 15 – Carga x Deformação de S18 (localizado na diagonal apoio-carga das vigas)



Como as vigas do estudo são consideradas curtas, elas têm o desenvolvimento de fissuras orientado na direção do ponto de aplicação de carga. Percebe-se pelo gráfico de S18 uma perturbação por volta da carga de 130 kN. Esse momento marca uma transição na evolução das deformações. Isso ocorre por ser justamente por volta dessa carga o surgimento e aumento da quantidade de fissuras de



cisalhamento na face da viga. Até esse ponto, a evolução das deformações de todas as vigas era muito semelhante. A partir dessa carga, as deformações das vigas que utilizam RCD passam a crescer mais rapidamente que as da viga referência. Esse comportamento também pode ser observado nos gráficos de S5 e S6, isso quer dizer que por volta de 130 kN as tensões principais de tração excederam a resistência do concreto à tração, então houve uma transferência do esforço de tração que estava sendo resistido pelo concreto para a armadura transversal.

O extensômetro S18 da viga 50% graúdo a partir de 161,81 kN registrou diminuição das deformações até apresentar deformações de tração. Isso ocorreu por conta do fato desse extensômetro estar localizado em uma região a qual há a principal fissura de cisalhamento. Acredita-se que após a fissura passar próxima ao extensômetro, ou em alguns casos atravessa-lo, esse equipamento tenha sido danificado.

Analisando-se todos os gráficos de deformações nas diagonais, é verificado que todas as vigas de concreto contendo agregado reciclado de RCD possuem bielas de compressão mais deformáveis que a viga de referência confeccionada com concreto tradicional. Entre as vigas que utilizam material reciclado, a que obteve menor deformação (mais próxima à referência) foi a viga 35% graúdo.



### 3-CONCLUSÕES

A fabricação de concretos contendo agregados reciclados de RCD de fato requer mais atenção que as concretagens tradicionais. Com índices de absorção altos deve-se tomar cuidado principalmente quando empregados em concretos com baixo fator água/cimento. Contudo, considera-se viável a confecção desse tipo de concreto desde que todas as variáveis estejam controladas e seja garantida a execução do traço previamente definido.

Os resultados dos ensaios de flexão simples mostraram que as vigas que utilizam concreto reciclado alcançaram valores de carga última próximos aos da viga referência, sendo em alguns casos até superior. Na verificação visual das fissuras foi constatada a fissuração anterior das vigas de concreto reciclado. As vigas de concreto reciclado também apresentaram maiores aberturas de fissuras, tendo a viga 50% miúdo o pior resultado. Isso sugere um pior comportamento do agregado miúdo reciclado de RCD quanto à fissuração.

De forma geral, a viga referência apresentou menores deformações nos estribos que as vigas contendo agregados reciclados. Esse pior desempenho das vigas de RCD sugere que maiores esforços foram resistidos por suas armaduras transversais, ocasionando maiores deformações. Um fator que pode ter influenciado nesse comportamento é o menor valor de  $V_{c0}$  das vigas de RCD, já que o mesmo está diretamente relacionado ao resultado do ensaio de tração na flexão e os concretos reciclados obtiveram menores resistências na tração direta. Menor  $V_{c0}$  significa menor parcela dos mecanismos complementares ao da treliça, parcela que ajuda na resistência ao esforço cortante.

Apesar das vigas confeccionadas com agregados reciclados de RCD possuírem uma redução de resistência ao esforço cortante, esse decréscimo é pequeno. Aliado ao fato das cargas últimas serem próximas à da viga referência, conclui-se que a utilização de concretos contendo diferentes teores e tipos de agregado em vigas de concreto armado é tecnicamente viável.

Nas análises locais (deformação do aço e concreto), a viga 50% miúdo teve desempenho inferior que as vigas com substituição de agregado graúdo. Por outro lado, na análise global a viga 50% miúdo teve o segundo melhor desempenho, atrás apenas da referência. Considera-se possível a substituição dos dois tipos de agregados, porém analisando-se os resultados os concretos com substituição de agregado graúdo por agregado graúdo de RCD se aproximaram mais do concreto convencional.



### 3. REFERÊNCIAS

1. PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
2. CONAMA. **Resolução No 307**. Brasil, 17 de julho de 2002.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
4. LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
5. DA CUNHA, P. F. **Análise experimental de vigas produzidas com concretos mistos confeccionados com agregados miúdos convencionais e reciclado de resíduos de construção e demolição (RCD)**. 2009. (Projeto de Graduação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.



## ANÁLISE DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

**Gabriel Schaan Chiele (1); Juliana Giazzon Cavalli (2); Maira Machado Vogt (3); Morgane Bigolin(4); Angela Gaio Graeff(5); Luiz Carlos Pinto da Silva Filho(6)**

(1) UFRGS – gabrielchiele@gmail.com; (2) UFRGS – julianagiazzon@gmail.com; (3) UFRGS – mairavogt@gmail.com; (4) UFRGS – morgane.b@gmail.com; (5) UFRGS – angel.graeff@gmail.com; (6) UFRGS – lcarlos66@gmail.com

### RESUMO

A inovação e a tecnologia trazem evidentes benefícios à construção civil, entretanto também suscitam novos desafios em relação às questões ambientais, que muitas vezes são desconsideradas no processo. O entulho gerado nas construções é frequentemente descartado de forma irregular, configurando-se em um problema para as cidades, sendo necessária a busca de soluções para amenizar esta problemática. Uma das alternativas é a reciclagem dos Resíduos de Construção e Demolição como forma de agregados para uso em artefatos de concreto. Nesse sentido, a parceria da UFRGS com a ONG Solidariedade busca reaproveitar estes resíduos como agregados reciclados para a produção de blocos de concreto. Assim, a Universidade fornece a assessoria técnica a fim de que os blocos atendam aos requisitos das normativas. Este artigo apresenta os resultados de análise dimensional, resistência à compressão e absorção em relação aos blocos de concreto produzidos. Os resultados dos ensaios se mostraram positivos e promissores tanto para a utilização dos agregados como para comercialização dos blocos de concreto com função de vedação. Esta pesquisa torna-se importante uma vez que apoia o trabalho realizado na ONG, visando gerar trabalho e renda, incentivando a prática do desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** Resíduos de Construção e Demolição, Sustentabilidade, Bloco de concreto, Agregado reciclado.

## ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF THE PRODUCTION OF CONCRETE BLOCKS USING RECYCLED AGGREGATES

### ABSTRACT

Innovation and technology bring clear benefits to civil construction, however, they also raise new challenges concerning environmental issues, which are often ignored in the process. The waste generated in the constructions is often discarded in an irregular way, becoming a problem for the cities, being necessary the search of solutions to mitigate this problem. One of the alternatives is the recycling of Construction and Demolition Waste as a form of aggregates for use in concrete artifacts. In this sense, the partnership between UFRGS and the NGO Solidariedade seeks to reuse these wastes as recycled aggregates for the production of concrete blocks. Thus, the university provides technical advice in order for the blocks to comply the regulations requirements. This paper presents the results of dimensional analysis, compressive strength and blocks absorption in relation to concrete blocks produced. The results of the tests were positive and promising both for the use of the aggregates and for commercialization of concrete blocks with a sealing function. This research becomes important since it supports the work carried out in the NGO, aiming to generate work and income, encouraging the practice of sustainable development.

**Key-words:** Construction and Demolition Waste, Sustainability, Concrete block, Recycled aggregate.



## 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é o principal indicador de crescimento da economia nacional. Em contrapartida, o setor também é responsável por um alto consumo de recursos naturais, contribuindo para degradação do meio ambiente. Além disso, em 2017, segundo o Panorama de Resíduos Sólidos emitido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 62,85% da totalidade de resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil provinham da construção civil - são 45 milhões de toneladas produzidas por ano (ABRELPE, 2017).

Atualmente incentiva-se o reaproveitamento de resíduos dentro do próprio setor de construção civil como alternativa sustentável. São vários os estudos a respeito da aplicabilidade destes resíduos como agregados para argamassa e concreto não-estrutural. Carneiro (2005) e Paula (2010), em suas análises, verificam a viabilidade de produção de artefatos de concreto a partir de agregados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) para fins não-estruturais. Nos estudos de Mesquita (2015) e Gomes (2018), assegura-se a possibilidade de utilização de RCD em substituição a agregados naturais em blocos de concreto.

Visando esta problemática, em Porto Alegre criou-se através da ONG Solidariedade uma possibilidade para reuso dos RCDs. A demanda surgiu após ser estabelecida a Lei Municipal nº 10.531 que proibiu a circulação de veículos com tração animal em Porto Alegre e carroceiros passaram a enfrentar ainda mais dificuldades. Criou-se então o Centro de Transformação Sócio Ambiental (CTSA), projeto que engloba a produção e comercialização de blocos de concreto para alvenaria de vedação fabricados a partir de RCD com o intuito de oferecer uma possibilidade de renda para essas famílias.

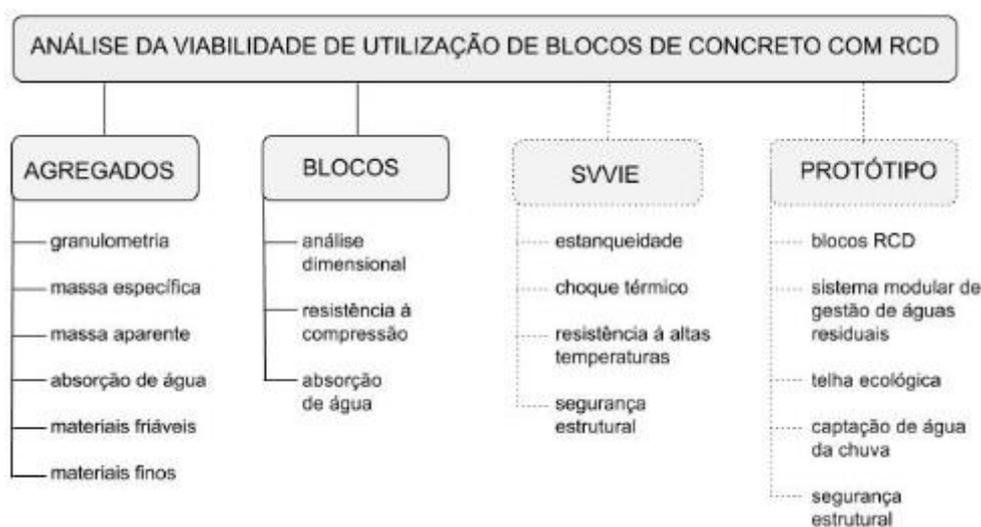
Desde 2009 a UFRGS oferece apoio científico e tecnológico à ONG Solidariedade a fim de viabilizar e certificar o produto possibilitando sua comercialização. Através do projeto Morar.TS, objetivou-se capacitar os cooperativados para a produção de blocos de concreto com RCD. Após a realização de cursos, teve início a produção dos blocos no galpão da ONG Solidariedade e os ensaios técnicos realizados pela equipe UFRGS no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). Dessa forma, o objetivo da presente pesquisa foi apresentar os resultados as características físicas e propriedades mecânicas de blocos vazados de concreto produzidos pela cooperativa e com utilização de agregados RCD em substituição a agregados naturais.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados os resultados dos ensaios previstos na norma NBR 15116 (ABNT, 2004) para agregados de RCD e na norma NBR 6136 (ABNT, 2016) referentes à blocos de concreto. A Figura 1 apresenta um organograma da pesquisa completa que, além da avaliação do agregado e dos blocos, inclui análise do desempenho desses blocos em Sistemas de Vedações Verticais. Ainda, é previsto construção de um protótipo de banheiro ecológico que, além dos blocos RCD, utilizará outras técnicas e materiais sustentáveis.

Figura 1 – Organograma da pesquisa



Fonte: Autoria própria

### 2.1 Produção dos Agregados

Os RCDs utilizados para a fabricação dos agregados são classificados segundo a resolução nº 307, do CONAMA como de Classe A. O fornecimento dos RCD é obtido de maneira autônoma através de doações locais e carroceiros da região, o que explica a sua variabilidade.

Após o recebimento, os materiais são segregados e o resíduo então é imediatamente processado. Na Figura 2, visualizam-se os equipamentos para britagem na ONG e o material beneficiado que é armazenado em pilhas ao ar livre, diretamente sobre piso de concreto.



Figura 2 – Esteira com britador e armazenamento dos agregados



Fonte: Autoria própria

Após passar pelo britador, o material segue através de esteira para as peneiras, onde é segmentado em 4 subprodutos, relacionados a seguir, segundo NBR 9935 (ABNT, 2011): areia artificial, pedrisco - agregado graúdo (passante na peneira 12,5 mm e ficam retidos na malha de 4,75 mm); finos - material granular que passa na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m; agregado graúdo com granulometria acima de 12,5 mm (não utilizado na produção dos blocos).

Apesar da norma supracitada determinar que a separação entre o agregado miúdo e o agregado graúdo seja feita com a peneira com abertura de malha de 4,75 mm, para a produção dos blocos na CTSA utiliza, na prática, a peneira de malha 2,36 mm para fazer essa separação. Porém, ressalta-se que, para os ensaios, os agregados foram separados seguindo a terminologia indicada pela NBR 9935 (ABNT, 2011).

## 2.2 Blocos

Os blocos de concreto produzidos na cooperativa caracterizam-se como tipo vazado de 3 furos, com dimensões nominais de 14×19×39 cm e visa-se enquadrá-los segundo a NBR 6136 (ABNT, 2016) como Classe C – com ou sem função estrutural para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo. Na Figura 3, visualiza-se a vibro prensa utilizada atualmente para produzir os blocos de concreto.



Figura 3 – Vibro prensa pneumática e blocos de concreto



Fonte: Autoria própria

A relação água/cimento é mantida em 0,6 pois a diminuição do uso de água, apesar de aumentar a resistência dos blocos, afeta o agrupamento dos agregados e impossibilita o desenforme correto dos blocos. O corrente traço em utilização na cooperativa é 1:3:2 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo). Para possibilitar a comparação entre o desempenho da utilização de apenas agregado RCD e de traços com substituição parcial de agregado natural foi mantido a mesma proporção nos blocos A, B e C.

Para facilitar a compreensão dos resultados apresentados, considerou-se, na Tabela 1, a terminologia adotada pela cooperativa para a caracterização de traço dos blocos A, B e C, sendo o agregado miúdo definido como material passante na peneira de malha 2,36 mm e retido na peneira de malha de 150 µm e o agregado graúdo definido como material retido na peneira de malha 2,36 mm.

O bloco A é composto na sua totalidade por agregado reciclado. O processo de britagem do entulho gera agregado graúdo em maior quantidade em relação ao agregado miúdo. Diante disso, visando a melhoria do processo de logística, para o bloco B optou-se por substituir  $\frac{1}{3}$  de agregado miúdo reciclado por areia natural. Para o bloco C, além da substituição deste  $\frac{1}{3}$  no agregado miúdo, substituiu-se também  $\frac{1}{3}$  de agregado graúdo reciclado por agregado graúdo natural, este, derivado de ardósia. A Tabela 1 discrimina as proporções de agregado adotadas para cada bloco.

Tabela 1 – Proporções de agregado dos blocos de concreto

Bloco	Cimento	Agregado miúdo		Agregado graúdo		Relação água/cimento (a/c)	Agregado RCD
		RCD	Natural	RCD	Natural		



A	CP IV-32	100%	-	100%	-	0,6	100%
B	CP IV-32	66%	33%	100%	-	0,6	80%
C	CP IV-32	66%	33%	66%	33%	0,6	66,66%
Traço	1	3		2		0,6	

Fonte: Autoria própria

### 2.2.1 Ensaio

A caracterização dos agregados foi realizada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2004) referente à composição granulométrica; a NBR NM 53 (ABNT, 2009) referente à massa específica, massa aparente e absorção de água do agregado grúdo; a NBR NM 52 (ABNT, 2009) referente à massa específica e massa aparente do agregado miúdo; a NBR NM 30 (ABNT, 2001) referente à absorção de água do agregado miúdo; a NBR 7218 (ABNT, 2010) referente ao teor de torrões de argila e materiais friáveis; e a NBR NM 46 (ABNT, 2003) referente ao teor de material passante na malha 75 µm.

Os ensaios com os blocos de concreto foram realizados com o intuito de verificar a qualidade dos blocos para alvenaria de vedação vertical através dos métodos de ensaio descritos na NBR 12118 (ABNT 2013) e visando atender aos requisitos mínimos da norma NBR 6136 (ABNT, 2016) para dimensões nominais, absorção de água e resistência à compressão dos blocos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

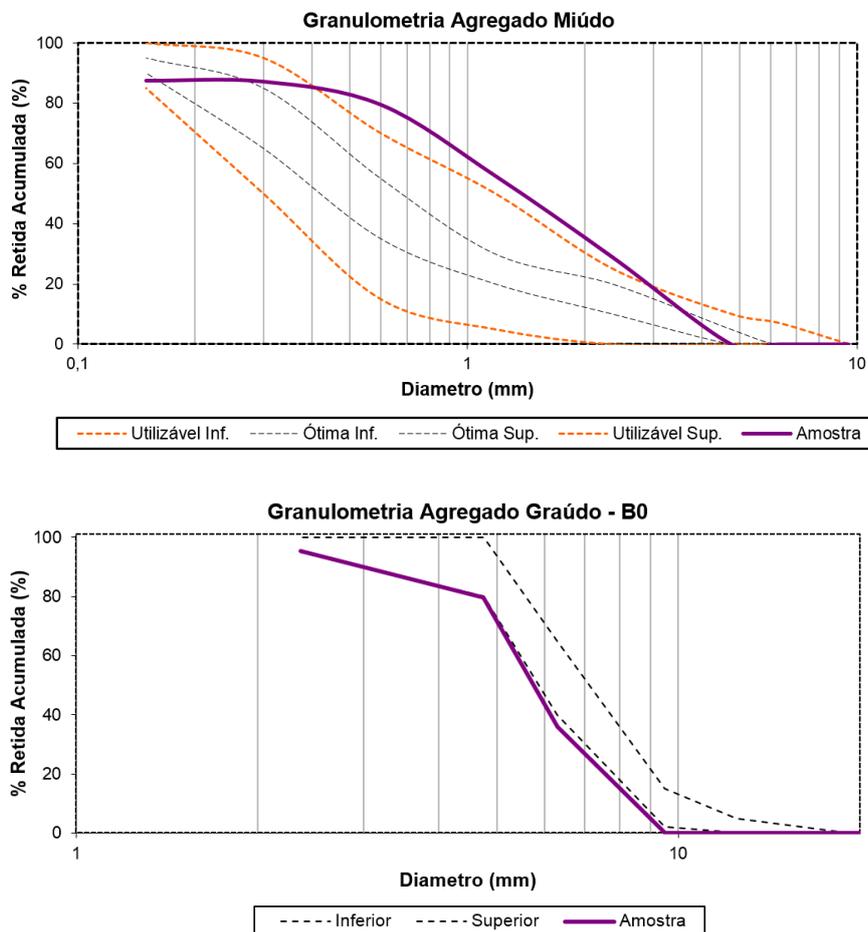
### 3.1 Caracterização dos Agregados

#### 3.1.1 Composição granulométrica

A Figura 4 apresenta as curvas granulométricas de cada agregado, em roxo. Os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005) são representados pelas linhas pontilhadas.



Figura 4 – Gráficos das curvas granulométricas



Fonte: Autoria própria

Observa-se pelo primeiro gráfico que o agregado miúdo, não se encontra dentro dos limites determinados pela norma, isso se deve, principalmente, pela grande quantidade de grãos muito finos presentes em sua composição. Há necessidade de adequação de sua granulometria aos padrões da NBR 7211, aprimorando o processo de britagem do RCD na própria cooperativa. Verifica-se no gráfico subsequente que o agregado graúdo apresenta uma granulometria muito próxima ao limite inferior. Isto de fato deve acontecer, pois, para a produção dos blocos, o tamanho do agregado graúdo não pode ultrapassar a dimensão da parede menos espessa do bloco.



### 3.1.2 Massa específica e massa específica aparente

Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011) são considerados como agregado de densidade normal aqueles com densidade geralmente compreendida entre 2,0 g/cm<sup>3</sup> a 3,0 g/cm<sup>3</sup>. Já a NBR NM 35 (ABNT, 2008), classifica como agregados leves para concreto estrutural os materiais que tem massa específica aparente máxima igual a 1,12 g/cm<sup>3</sup>. A tabela 2 apresenta os resultados encontrados.

**Tabela 2 – Massa específica e massa específica aparente**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO		
Característica	Agregado Graúdo 4,75mm < x < 9,5mm	Agregado Miúdo < 4,75mm
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,04
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,06	1,69

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, apesar do agregado miúdo possuir densidade um pouco abaixo do limite considerado normal, pondera-se que ele ainda se encontra com densidade muito elevada para ser considerado de tipo leve. Logo, ambos os agregados aqui pesquisados se enquadram como tipo normal, cuja aplicação é indicada na produção de concretos convencionais até os de alto desempenho.

### 3.1.3 Absorção de água, teor de torrões de argila e materiais friáveis e teor de material passante na malha 75µm

Os resultados em verde representam valores que atendem às exigências mínimas da NBR 12118 (ABNT, 2013), já os destacados em vermelho os que não atendem.

**Tabela 3 – Absorção de água, torrões de argila e materiais friáveis e material passante na malha 75µm**

AGREGADO				
Classificação	Intervalo Granulométrico	Ensaio	Requisitos (%)	Resultado (%)
Graúdo	4,75 < x < 9,5	Absorção de água	≤ 12	10,23
		Torrões de argila e materiais friáveis	< 2	0,67
Miúdo	< 4,75	Absorção de água	≤ 17	9,93
	1,18 < x < 4,75	Torrões de argila e materiais friáveis	< 2	5,84



## 3.2 Blocos

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os blocos. Em verde estão apresentados os valores que atendem às exigências mínimas da NBR 6136 (ABNT, 2016), já os destacados em vermelho não atendem.

### 3.2.1 Análise Dimensional

Na Tabela 4 observa-se resultados inadequados em relação às dimensões dos blocos, que não correspondem às condições ideais previstas na NBR 6136 (ABNT, 2014), principalmente referente às espessuras das paredes do bloco.

Tabela 4 – Resultados da análise dimensional

ANÁLISE DIMENSIONAL					
Dimensões	Requisitos (mm)		A	B	C
Comprimento	390	±3,0	390,59	391,00	390,95
Largura	140	±2,0	142,47	141,63	141,77
Altura	190	±3,0	187,03	186,45	184,80
Espessura das paredes longitudinais	18	-1,0	19,53	19,05	19,02
Espessura das paredes transversais	18	-1,0	21,73	21,86	22,00

Fonte: Autoria própria

Esses resultados podem ser explicados principalmente devido ao processo semi industrial de fabricação dos blocos ser influenciado tanto pela limitação de precisão do maquinário quanto por seu desgaste.

### 3.2.2 Absorção de água

Na Tabela 5, verifica-se as médias de absorção de água acima dos valores requisitados pela NBR 6136 (ABNT, 2016).



**Tabela 5 – Resultados dos ensaios de absorção de água**

ABSORÇÃO DE ÁGUA							
Traço	Quantidade de blocos ensaiados	Requisitos		Resultados			
		Individual (%)	Média (%)	Quantidade de blocos aprovados individualmente	Média (%)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
Bloco A	6	≤ 16,0	≤ 13,0	1	17,43	1,77	10,15
Bloco B	3			3	15,40	8,79	57,04
Bloco C	3			2	15,68	0,55	3,52

Fonte: Autoria própria

Um dos fatores que justifica este resultado é o fato do teor de absorção de água dos agregados RCD utilizados no processo ser consideravelmente maior que o dos agregados naturais. Estudos (BARBOSA et al, 2008, MEIER, 2011, SILVA JUNIOR, 2019) mostram uma média de absorção de água em torno de 3,2% para a areia natural e de 0,5% para a brita granítica.

Verifica-se ainda que o bloco A em condições de saturado com superfície seca absorveu mais água em relação aos blocos B e C, cuja composição inclui agregado natural. Apesar de individualmente os três corpos de prova do bloco B terem sido aprovados, sua média ultrapassou em 2,4% a absorção máxima permitida. Embora o uso e estanqueidade dos blocos seja condicionado ao uso de revestimento externo, os resultados em relação à absorção de água precisam ser melhorados com novos estudos de traço.

### 3.2.3 Resistência à compressão

A tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão encontrados para os traços A, B e C.

**Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					
Bloco	Quantidade de blocos ensaiados	Requisito (MPa)	Resultado (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
A	11	≥ 3	1,36	1,55	113,75
B	6		3,16	0,91	28,70
C	6		2,17	1,09	50,31

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 7, verifica-se que somente o bloco B atingiu o parâmetro de resistência característica à compressão axial superior à 3 MPa para blocos de vedação tipo C. No bloco A utilizou-se somente agregado reciclado justificando sua menor resistência mecânica. O bloco C que inclui uma parte de



ardósia foi ensaiado devido à disponibilidade desse material na cooperativa, porém diante do melhor desempenho do bloco B tanto em relação à absorção de água quanto à resistência à compressão, o uso desse material para novos blocos foi descartado.

Os resultados dos ensaios evidenciam avanço considerável de desempenho dos blocos quando adicionado pequenas frações de agregado natural. Enquanto o bloco A composto inteiramente por agregado RCD, resistiu à 1,36 MPa, o bloco B - que tem apenas 20% do seu agregado sendo natural - atingiu resistência à compressão de 3,16 MPa, resultado satisfatório diante da NBR 6136 (ABNT, 2016). Nesse sentido, prevê-se, para o desenvolvimento da pesquisa, a elaboração de novos traços que incluam agregado natural.

#### **4. CONCLUSÕES**

Objetivou-se com o presente artigo apresentar resultados sobre a viabilidade de produção de blocos de concreto a partir da utilização de RCD. Através de revisões bibliográficas, verificou-se o sucesso de pesquisas similares que sustentam a possibilidade de comercialização de blocos de concreto produzidos com estes resíduos. No entanto, conforme a experiência da pesquisa que se caracteriza pela produção em cooperativa, busca-se tornar economicamente inviável a produção de blocos de concreto utilizando somente agregados reciclados.

Os resultados apesar de não atenderem a todos os critérios normativos indicam caminhos e possibilidades de avanços. Porém, o principal desafio é encontrar soluções que atendam aos parâmetros das normas técnicas e ao mesmo tempo sejam compatíveis com as capacidades produtiva e financeira da CTSA.

É importante ressaltar que além do caráter científico a pesquisa também tem forte apelo de extensão e aplicação prática do conhecimento acadêmico. Contribuindo com uma visão mais social na transmissão do conhecimento bem como incentivando e abrangendo a lógica reversa, fechando o seu ciclo produtivo com reutilização dos resíduos gerados pelo próprio setor.



## 5. REFERÊNCIAS

1. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. São Paulo: [s.n.], 2017. 74 p. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 24 set. 2018.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais - desempenho - parte 1 - requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações Habitacionais – desempenho - parte 4 - Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
8. BARBOSA, Maria Teresa Gomes et al. **Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 51-60, out./dez. 2008.
9. BIGOLIN, Morgane; GRAEFF, Ângela G. (Org.); SILVA FILHO, L. C. P. (Org.). **Projeto mãos à obra. Tecnologias sociais e produção de blocos com RCD**. 1. ed. Porto Alegre, 2014. v. 1000. 104p.
10. BIGOLIN, Morgane. **Indicadores de desempenho para blocos de concreto: uma análise de requisitos mais sustentáveis para a produção a partir de RCD**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.
11. BRASIL. **Decreto lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm)> Acesso em: 28 maio 2019.
12. CARNEIRO, Fabiana Padilha. **Diagnóstico e Ações da Atual Situação dos Resíduos de Construção e Demolição na Cidade de Recife**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.
13. CHIELE, Gabriel Schaan. Proposta de avaliação do desempenho de protótipo construído em blocos de concreto com resíduos de construção e demolição. In: Congresso Brasileiro dos Engenheiros Sem Fronteiras. 5. 2018. Natal, RN. **Anais do evento...** Disponível em: <<https://www.doity.com.br/anais/cbesf2018/trabalho/72986>>. Acesso em: 18 fev. 2019.
14. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE– CONAMA. **Resolução nº 307. 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 28 maio 2019.



15. GOMES, Paulo César Correia et al. **Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos.** Ambiente Construído, [s.l.], v. 17, n. 3, p.267-280, jul. 2017.
16. MEIER, Denis. **Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e região metropolitana.** Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Concreto). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2011.
17. MESQUITA, Leonardo Carvalho *et al.* **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos de vedação.** v.10, n.3, p. 30-40, [recurso eletrônico], Goiânia: Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 2015. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/reec>>. Acesso em: 24 set. 2018.
18. PAULA, P.R.F. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural.** Dissertação. Tecnologia das Construções. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, PE, 2010. 131 p.
19. PORTO ALEGRE. **Lei nº 10.531, de 10 de setembro de 2008.** Institui, no Município de Porto Alegre, o Programa de Redução Gradativa do Número de Veículos de Tração Animal e de Veículos de Tração Humana e dá outras providências. Disponível em: <<https://bit.ly/2MM78Se>>. Acesso em: 28 maio 2019.
20. PORTO ALEGRE. **Lei nº 10.847, de 9 de março de 2010.** Institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do Município de Porto Alegre. Disponível em: <<https://bit.ly/2SyIMJP>>. Acesso em: 28 maio 2019.
21. SILVA JÚNIOR, F. A. da; Martinelli, A. E. **Análise das propriedades do agregado graúdo: brita de origem calcária, proveniente do rejeito da fabricação de cimentos, para compósitos cimentícios.** Anais do 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/204-093.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2019.
22. SINDUSCON-SP. **Construção civil encerra 2017 com menos 125 mil vagas.** São Paulo: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://sindusconsp.com.br/release/sinduscon-sp-construcao-civil-encerra-2017-com-menos-125-mil-vagas/>>. Acesso em: 19 abril 2019.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Finep, instituição que apoia a pesquisa através do projeto Morar.TS e ao CNPq, pelo apoio financeiro através da bolsa de iniciação científica. Também agradecemos ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais e toda sua equipe pela solícita ajuda aos bolsistas. Ademais, agradecemos ao professor Luiz Carlos, grande entusiasta da pesquisa e incentivador da continuidade do projeto. Por fim, agradecemos à ONG Solidariedade pela oportunidade de estar realizando trabalho social que disponibiliza tecnologia e informação à comunidade.



# ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE AREIA INDUSTRIAL EM SUBSTITUIÇÃO À AREIA NATURAL PARA A CONFECÇÃO DE ARGAMASSAS PARA ALVENARIA ESTRUTURAL CERÂMICA

**Eloise Guzzo<sup>(1)</sup>; Paulo Roberto Dutra<sup>(2)</sup>; Gilson Francisco Paz Soares<sup>(3)</sup>**

(1) URI Erechim – eloisegu@hotmail.com; (2) URI Erechim – paulo\_rdutra@outlook.com; (3) URI Erechim – gilsonfps@uricer.edu.br

## RESUMO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que se caracteriza pela racionalidade dos processos executivos. Nesse sentido, a incorporação de resíduos do processo de britagem de rocha pode contribuir com a redução de passivos ambientais, além de potencializar o seu desempenho. Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a possibilidade de utilização de um material alternativo, mais sustentável e de menor custo. O método utilizado consistiu na substituição total do agregado miúdo natural por outro de origem industrial. Para tanto, foram confeccionadas duas séries de prismas de dois blocos, com mesmo traço de argamassa de assentamento (1:1:4), variando-se apenas o tipo de agregado miúdo. O traço em questão foi escolhido a fim de que sua resistência se situasse no intervalo entre 70% e 100% da resistência característica à compressão do bloco. Os resultados da resistência à compressão dos prismas apontaram que ambas as séries apresentaram comportamento semelhante para o teor de substituição estudado. Por fim, pode-se afirmar que, dentre as várias formas de redução de custos e impactos ambientais na construção civil, a utilização de areia industrial pode ser uma solução adequada, uma vez que dá um novo significado a um material que até então seria descartado na natureza.

**Palavras-chave:** alvenaria estrutural, resistência à compressão, areia industrial.

## STUDY ON THE FEASIBILITY OF THE USE OF INDUSTRIAL SAND IN SUBSTITUTION TO THE NATURAL SAND FOR THE MANUFACTURE OF MORTARS FOR CERAMIC STRUCTURAL MASONRY

### ABSTRACT

Structural masonry is a building system known by rationality of the executive processes. Thus, the incorporation of waste from the rock crushing process can contribute to the reduction of environmental liabilities, in addict to improve its performance. Therefore, this work aimed to analyze the feasibility of using an alternative material, more sustainable and cheaper. The method used consisted in the total substitution of the natural small aggregate for another one of industrial origin. In order to do this, two sets of two-block prisms with the same mortar trace (1:1:4) were made, only the type of small aggregate being varied. The trace in question was chosen in order to be in the range of 70% a 100% of characteristic compressive strength of the block. The results of compressive strength of the prisms showed that both series presented similar behavior for the substitution content studied. Finally, it can be stated that among the various ways of reducing costs and environmental impacts in construction, the use of industrial sand may be an adequate solution, since it gives a new meaning to a material that would have been discarded in nature.

**Key-words:** structural masonry, compressive strength, industrial sand.



## 1. INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo tradicionalmente utilizado desde os primórdios da humanidade, quando surgiu a necessidade de abrigo. Em resumo, pode ser definida como a justaposição de blocos, unidos por argamassa, compondo paredes com função de vedação e estrutural. Desse modo, a sua resistência deve ser perfeitamente especificada e controlada, a fim de garantir a segurança da edificação<sup>(1)</sup>.

A argamassa de assentamento possui um papel secundário no desempenho mecânico da alvenaria estrutural. Cabe a ela desempenhar funções igualmente importantes, como absorver as deformações do conjunto e distribuir uniformemente as tensões atuantes<sup>(2)</sup>. Consequentemente, há a necessidade de atendimento aos seguintes requisitos: consistência, retenção de água, coesão e ausência de exsudação, no estado fresco; e resistência à compressão, aderência superficial, durabilidade e capacidade de acomodar deformações, no estado endurecido<sup>(3)</sup>. Nesse sentido, o uso de argamassas mistas de areia, cal e cimento garante uma boa resistência, além de excelente trabalhabilidade e retenção de água, devido à incorporação de aglomerante aéreo<sup>(4)</sup>.

Como alternativa, tem sido estudados diferentes materiais para a sua composição, como, por exemplo, agregados de origem industrial, provenientes de britagem de rocha basáltica. Por definição da ABNT NBR 9935: 2011<sup>(5)</sup>, é um “material granular resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, para uso como agregado em concreto ou argamassa”.

Santos<sup>(6)</sup>, ao substituir gradualmente a areia natural por areia de britagem em teores de 0, 25, 50, 75 e 100%, obteve os melhores resultados para retenção de água, coeficiente de capilaridade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão quando utilizada 25% de areia natural. Quanto à questão econômica, para esse nível de desempenho a economia seria de aproximadamente 12% em relação à argamassa composta por somente areia natural.

Logo, considerando a abundância de material e a baixa inserção no mercado da construção civil, o presente trabalho buscou avaliar o uso do resíduo do processo de britagem para a composição de argamassas para o assentamento de blocos cerâmicos estruturais. Com isso, poder-se-iam evitar os danos ambientais decorrentes da dragagem de areia natural do leito dos rios, além de propiciar a adequada disposição para a areia de britagem.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho consistiu na substituição total da areia natural pela areia industrial para a confecção das argamassas de assentamento. O teor de substituição de 100% foi escolhido para que pudesse ser estabelecida uma comparação direta entre o agregado e a resistência mecânica da argamassa. A resistência à compressão do prisma foi definida como variável de resposta.

### 2.1. Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram empregados materiais comumente utilizados na região de Erechim-RS, a saber: bloco cerâmico estrutural, cimento Portland do tipo CP II-Z, cal hidratada do tipo CH-III, agregado miúdo de origem natural e industrial.

#### 2.1.1. Bloco cerâmico estrutural

Os blocos utilizados para a confecção dos prismas foram blocos cerâmicos estruturais com paredes externas maciças e interna vazada (Fig. 1). Conforme a ABNT NBR 15270-2:2017<sup>(7)</sup>, para uma amostra de 12 blocos foram realizadas as caracterizações geométricas (dimensão efetiva das faces, área bruta e área líquida) e mecânica (resistência característica à compressão). Como a caracterização geométrica está relacionada principalmente com a aceitação do lote, são apresentados apenas os valores de resistência à compressão.

Figura 1 – a) Bloco cerâmico estrutural utilizado; b) Determinação da resistência à compressão do bloco.





A resistência característica estimada de cada amostra, para ambas foi calculada a partir da seguinte equação, de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 15270-2: 2017<sup>(7)</sup>:

$$f_{bk,est} = \left[ \frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i - 1} \right] - f_{bi} \quad (A)$$

onde

$f_{bk,est}$ : resistência característica estimada da amostra, em MPa;

$f_{b(1)}, f_{b(2)}, \dots, f_{bi}$ : valores de resistência à compressão individual dos corpos de prova da amostra, ordenados crescentemente;

$i$ :  $n/2$ , se  $n$  for par,  $(n - 1)/2$ , se  $n$  for ímpar;

$n$ : quantidade de blocos da amostra.

Para cada amostra de 12 corpos de prova, calculou-se o  $f_{bk,est}$  e, em seguida, efetuou-se a seguinte análise:

- Se  $f_{bk,est} \geq f_{bm}$  (média da resistência à compressão dos corpos de prova da amostra),  $f_{bm}$  é adotado como a resistência característica do lote ( $f_{bk}$ );
- Se  $f_{bk,est} < \emptyset \cdot f_{b(1)}$  (menor resistência à compressão dos corpos de prova da amostra), o  $f_{bk}$  é dado pela expressão  $\emptyset \cdot f_{b(1)}$ , onde  $\emptyset$  varia em função da quantidade de blocos ( $\emptyset$  é igual a 0,98 para uma amostra contendo 12 blocos);
- Se  $f_{bk,est}$  estiver entre os dois limites ( $\emptyset \cdot f_{b(1)}$  e  $f_{bm}$ ), adota-se este valor como resistência característica à compressão ( $f_{bk}$ ).

Considerando a Eq. (A), os valores individuais, médio e característico da amostra de blocos são apresentados na Tab. 2. Observa-se que há uma variabilidade de valores em torno da média, denotada pelo alto coeficiente de variação. No entanto, como o projeto estrutural está pautado na resistência característica à compressão do prisma, o valor característico da resistência do bloco prevalece sobre os demais valores.



Tabela 2 – Resistência à compressão uniaxial do bloco cerâmico estrutural.

Corpo de prova	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
1	11,55
2	10,56
3	10,06
4	9,88
5	8,79
6	12,46
7	10,95
8	13,95
9	8,00
10	10,52
11	13,92
12	7,25
Média (MPa)	10,66
Desvio padrão (MPa)	2,10
Coefficiente de variação (%)	19,70
Resistência característica à compressão (MPa)	7,10

### 2.1.2. Agregado miúdo

Como agregado miúdo foram utilizadas a areia natural e a areia industrial, as quais foram caracterizadas quanto à massa específica<sup>(8)</sup>, determinação da massa unitária<sup>(9)</sup>, composição granulométrica<sup>(10)</sup> e absorção de água<sup>(11)</sup>. Os resultados da etapa de caracterização dos agregados naturais e artificiais são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 - Caracterização do agregado miúdo.

Propriedade do material	Natural	Industrial
Módulo de finura	2,24	3,04
Dimensão máxima característica (mm)	4,80	4,8
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,87
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,55	1,53
Absorção de água (%)	0,47	3,22



Devido ao maior teor de material pulverulento quando comparada à areia natural, pode ser necessário que argamassas com substituição de 100% de agregado industrial requeiram uma quantidade maior de água de amassamento. Assim, a tendência é de que haja um decréscimo de resistência e formação de fissuras no estado endurecido.

## 2.2. Estudo de dosagem das argamassas

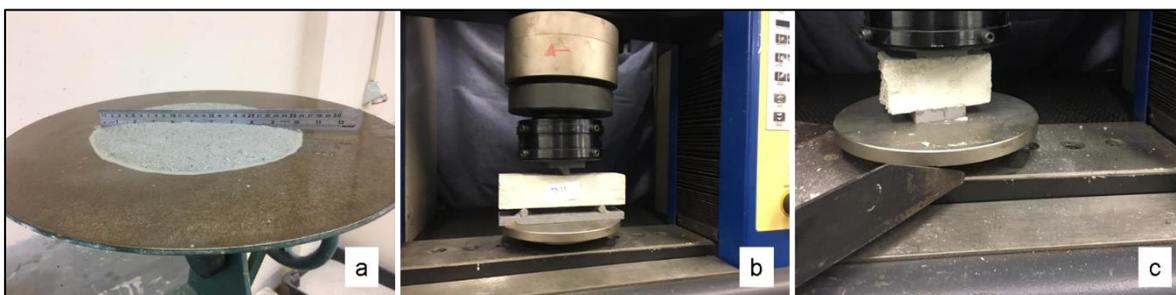
A fim de melhor definir um traço de argamassa cuja resistência à compressão se situasse no intervalo entre 70 e 100% da resistência característica à compressão do bloco, três traços foram ensaiados para cada tipo de agregado miúdo: 1:0,5:5, 1:1:4 e 1:1:6 (Fig. 2).

Figura 2 – Moldagem dos corpos de prova de argamassa.



Para cada traço, foram determinados o índice de consistência<sup>(12)</sup>, além da resistência à tração na flexão e resistência à compressão<sup>(13)</sup>, como mostra a Fig. 3. Os corpos de prova foram rompidos após um período de 28 dias de cura em câmara climatizada (temperatura de 25 °C e umidade de 60%).

Figura 3 – a) Índice de consistência; b) Resistência à tração na flexão; c) Resistência à compressão.





Para a confecção dos traços das argamassas, a relação água/aglomerante foi adequada (Tab. 4), posto que a consistência atingiu o valor padrão de  $255 \pm 10$  mm<sup>(12)</sup>. Uma vez definidas as quantidades de materiais necessárias, avaliou-se o desempenho mecânico das argamassas (Tab. 5).

Tabela 4 – Índice de consistência e relação água/aglomerante das argamassas.

Traço	Areia natural		Areia industrial	
	Relação água/aglomerante	Índice de consistência (mm)	Relação água/aglomerante	Índice de consistência (mm)
1:1:4	0,66	255	0,80	255
1:0,5:5	0,90	245	1,20	260
1:1:6	1,20	255	1,50	255

Tabela 5 – Resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas.

Traço	Areia natural		Areia industrial	
	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
1:1:4	2,10	5,70	1,30	6,70
1:0,5:5	2,70	6,50	1,40	7,90
1:1:6	2,00	3,90	0,90	4,40

Os resultados obtidos mostraram-se coerentes, sendo que a utilização de areia industrial proporcionou argamassas mais resistentes. Contudo, deve-se evitar a combinação de argamassas muito rígidas com blocos pouco resistentes, dado que, desta maneira, a junta de assentamento não possui a capacidade adequada para absorver as deformações a que a alvenaria está sujeita. Do mesmo modo, argamassas muito fracas tendem a comprometer a resistência final da parede. Assim, para o traço 1:1:4, em massa, a resistência da argamassa guarda uma relação de 80% da resistência característica do bloco, quando utilizada areia natural, e de 94%, quando utilizada areia industrial.



### 2.3. Produção dos prismas

Para cada tipo de agregado miúdo, oito prismas com dois blocos de altura (Fig. 4) foram produzidos e ensaiados à compressão uniaxial. A espessura da junta não foi objeto de análise, possuindo espessura de 10 mm e argamassamento em toda a área líquida do bloco.

Figura 4 – Confeção dos prismas.



## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os prismas foram ensaiados após 28 dias em câmara climatizada, sob condições controladas: temperatura de 25°C e umidade de 60%. Em seguida, procedeu-se à ruptura em prensa hidráulica a pêndulo, modelo PC200CS da marca EMIC, com capacidade máxima de 2000 kN (Fig. 5).

Figura 5 – Determinação da resistência à compressão do prisma.





A resistência à compressão dos prismas (Tab. 6) é expressa em relação à área bruta, ou seja, considerando a carga aplicada em toda a sua superfície. De forma análoga ao cálculo desenvolvido para os blocos, os menores valores foram utilizados para a determinação da resistência característica à compressão dos prismas.

Tabela 6 - Resistência à compressão dos prismas, em relação à área bruta.

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)	
	Areia natural	Areia industrial
1	8,09	8,09
2	7,68	8,64
3	6,78	5,67
4	6,62	5,94
5	8,85	6,05
6	6,22	7,07
7	6,99	8,86
8	7,17	8,46
Média (MPa)	7,30	7,35
Desvio padrão (MPa)	0,80	1,24
Coefficiente de variação (%)	11,03	16,88
Resistência característica à compressão (MPa)	6,09	5,27

Os valores médios de resistência à compressão dos prismas pouco variaram com o tipo de agregado miúdo, mesmo que a variabilidade tenha sido menor para os prismas confeccionados com areia natural. Quanto aos valores característicos, utilizados em projeto, os prismas com areia natural apresentaram resistência 15,5% menor do que aqueles produzidos com areia natural. Tal fato pode estar ligado à maior rigidez dos prismas com areia industrial, uma vez que a argamassa atingiu uma resistência bem próxima à resistência característica do bloco (94%  $f_{bk}$ ). Salienta-se que este aumento na rigidez da argamassa de areia industrial poderia ser minimizado com a incorporação de



aditivo, permitindo avaliar o seu efeito no prisma, nas mesmas condições mecânicas que a argamassa de areia natural.

## 4. CONCLUSÕES

Os valores médios de resistência à compressão dos prismas pouco se alteraram com a substituição do agregado miúdo. Contudo, a eficiência (resistência do prisma/resistência do bloco) diminuiu de 86% para 74% com o uso de areia industrial. Em edificações de baixa e média altura, onde as tensões atuantes são menores, a produção de argamassa de assentamento com agregado de origem industrial pode ser mais apropriada, principalmente no que tange aos aspectos ambientais e econômicos (menor custo em comparação com a areia natural).

Logo, pode-se afirmar que, dentre as várias formas e métodos de redução de custos e impactos ambientais, a utilização de agregado miúdo industrial apresenta-se como uma solução bastante interessante, posto que dá um novo destino a um material sem valor comercial que seria descartado na natureza.

## 5. REFERÊNCIAS

1. RAMALHO, M.; CORRÊA, M.R.S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2008.
2. CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed., atual. e ampl. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2. p. 893-944.
3. MOHAMAD, G. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2007.
4. PARSEKIAN, G. A, SOARES, M. M. **Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos: projeto, execução e controle**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2010.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.
6. SANTOS, T. F. dos. **Substituição da areia natural por areia de britagem de rochas basálticas para argamassas de assentamento**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado, 2017.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 2: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2017.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. 8f. Rio de Janeiro, 2006.



10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. 6f. Rio de Janeiro, 2003.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência Rio de Janeiro, 2002.

## **Paredes de concreto: estudo da utilização de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em concretos autoadensáveis**

### **Concrete walls: study of the use of ash from sugarcane bagasse in self-compacting concretes**

ALESSANDRA ZALESKI (1), DRIELLY MENOSSO (2), GABRIEL LUIS DALLA VECHIA(2), SUELEN VANZETTO (2) AND CRISTINA VITORINO DA SILVA(2)

(1) *Universidade Federal de Santa Catarina*; (2) *URI*

#### **RESUMO**

É crescente a busca por materiais alternativos que possam ser utilizados em substituição ao cimento Portland sem que haja prejuízo em seu desempenho com o objetivo de reduzir o consumo deste, uma vez que a cadeia produtiva do cimento é responsável por boa parte das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. A pesquisa teve como objetivo estudar a influência da substituição do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar no desempenho de paredes de concreto autoadensável. Primeiramente, estabeleceu-se o traço referência e realizou-se o emprego dos teores de substituições em 10% e 15%. Após a concretagem e moldagem dos corpos de prova, os concretos foram submetidos à cura úmida e exposta por 28 dias. Estudou-se a sua utilização por meio dos ensaios mecânicos: resistência à compressão uniaxial, módulo de deformação, absorção de água e dureza superficial. O melhor resultado para a resistência à compressão mostrou-se na substituição de 15% de cinza, assim, infere-se que a utilização da mesma possa ser considerada como um material alternativo para a produção de concreto e contribuir para a diminuição de CO<sub>2</sub> na atmosfera, porém é necessário ressaltar a indispensabilidade de mais estudos para aperfeiçoar seu uso.

Palavras-chave: Cinza. Cana-de-açúcar. Paredes de concreto. Concreto autoadensável.

#### **ABSTRACT**

There is a growing search for alternative materials that can be used in place of Portland cement without impairing its performance in order to reduce its consumption, since the cement production chain is responsible for a large part of the carbon dioxide in the atmosphere. The research had as objective to study the influence of the substitution of Portland cement by sugarcane bagasse ash in the performance of self-compacting concrete walls. Firstly, the reference trait was established and the substitution contents were used in 10% and 15%. After the concreting and molding of the test specimens, the concretes were submitted to moist curing and exposed for 28 days. Its use was studied through mechanical tests: uniaxial compression strength, modulus of deformation, water absorption and surface hardness. The best result for the compressive strength was in the substitution of 15% of gray, so it is inferred that the use of the same can be considered as an alternative material for the production of concrete and contribute to the decrease of CO<sub>2</sub> in the atmosphere, but it is necessary to emphasize the indispensability of further studies to improve its use.

Keywords: Grey. Sugar cane. Concrete walls. Self-compacting concrete.

## **1 INTRODUÇÃO**

A crescente geração de energia proveniente de fontes renováveis vem impulsionando a produção de álcool etanol a partir da cana-de-açúcar, aumentando assim, gradativamente a sua geração de resíduos, uma vez que o bagaço representa cerca de 30% da cana moída. Ainda, visado o caráter ecológico, têm-se também as indústrias cimenteiras que são responsáveis por 5% das emissões de CO<sub>2</sub> mundial, podendo este índice chegar a até 30% em 40 anos (DAMINELI, 2013). Considerando estes elementos, alternativas que visem uma correta disposição dos resíduos da cana-de-açúcar e a redução do uso de cimento na construção civil são de caráter urgente.

Esta pesquisa tem como objetivo, unir ambos os problemas abordados anteriormente, utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) em substituição ao cimento Portland (CPV – ARI) (em volume) e analisar seu comportamento por meio das propriedades mecânicas e de durabilidade em paredes de concreto autoadensável (PCAA).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O crescimento constante e acelerado da construção civil em decorrência do aumento populacional das cidades e da demanda pelo setor, ao longo das últimas décadas, vem trazendo cada vez mais a necessidade de soluções ecológicas e não prejudiciais ao meio ambiente, sendo o setor da construção civil, considerado o que mais consome recursos naturais e por consequência, o que produz maior quantidade de resíduos sólidos. Por conta disso, os sinais da degradação ambiental tornam-se maiores a cada ano e o impacto é sentido de forma direta pela população mundial (PAIXÃO, 2011).

Segundo Sousa (2009), a busca por materiais mais sustentáveis na construção tem levado os pesquisadores a utilizarem resíduos agrícolas e industriais como importante fonte de recursos opcionais, oferecendo, pelo menos, o mesmo nível de qualidade das tecnologias convencionais. Todavia, a viabilidade de aproveitamento desses resíduos está ligada à determinada conjuntura econômica onde predomine a escassez de materiais convencionais de construção aliada ao elevado custo de sua aquisição. Além disso, a utilização desses resíduos pode provocar a melhora nas propriedades tecnológicas dos componentes que vêm sendo utilizados.

O cultivo da cana-de-açúcar ocupa um papel de destaque na economia mundial. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), a produção de cana-de-açúcar na safra 2017/18 foi de 633,26 milhões de toneladas, cerca de 72.623 kg/ha, colocando o Brasil no topo da lista dos maiores produtores mundiais de cana há vários anos. Entretanto, há como consequência a elevada quantidade de resíduos agroindustriais e poluição ambiental que são gerados.

Segundo Cortez et al. (1992), cada tonelada de cana moída rende cerca de 250 kg de bagaço úmido (com média de 50% de umidade, 48% de fibras e 2% de sólidos solúveis), sendo que este, é a fração de biomassa resultante após os procedimentos de limpeza, preparo e extração do caldo de cana. A quantidade desse bagaço extraído chega a aproximadamente 30% da cana moída e tem sido aproveitado como fonte energética, pois cerca de 95% desta biomassa é queimada em caldeiras para geração de vapor na produção de açúcar e álcool (PAULA et al., 2009).

De acordo com Sampaio (2013), no decorrer da combustão nas caldeiras das usinas, alimentadas pelo bagaço para cogeração de energia elétrica, gera-se um novo resíduo, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Presume-se que para cada tonelada de cana-de-açúcar são produzidos 250 kg de bagaço e 6 kg de cinza residual após sua combustão (SOUZA et al., 2011).

São crescentes as pesquisas voltadas para o desenvolvimento de alternativas para uma destinação sustentável a esta cinza e também uma maneira de agregar valor ao subproduto da

indústria da cana-de-açúcar (SAMPAIO, 2013). A cinza é constituída basicamente por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), apresentando-se desta maneira como potencial de aditivo mineral em pastas, argamassas e concretos (CASTALDELLI et al., 2010).

Segundo Bahurudeen et al. (2015), a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material complementar de cimentação por meio de processamento e caracterização sistemáticos, oferece uma alternativa rentável e ecológica à sua disposição. Sabendo-se que a cadeia de construção civil consome mais de 50% dos recursos naturais e sendo o cimento responsável atualmente por 5% das emissões de  $\text{CO}_2$  mundiais, torna-se urgente a busca por alternativas, principalmente aquelas voltadas para o aproveitamento dos recursos naturais locais, e aproveitamento dos subprodutos gerados em atividades agroindustriais como a CBCA (PAULA, 2006).

Uma alternativa que se mostra válida é fazer o uso do concreto com cinza no sistema construtivo de parede de concreto. O qual é um sistema que consiste por ter sua estrutura e sua vedação formadas por um único elemento, a parede de concreto, que é moldada *in loco*. Este modelo oferece uma opção sustentável para a construção civil, por utilizar insumos industrializados que são submetidos a controle ambiental em sua produção, fôrmas que podem ser reaproveitadas várias vezes e por diminuir consideravelmente o desperdício e o descarte de resíduos. Ainda, ocorre uma redução do duplo trabalho, dado que a moldagem desta é feita em local definitivo, evitando assim uma série de gastos com mão-de-obra devido à redução do tempo de execução. Por este motivo trata-se de um sistema amplo em sua área de abrangência, ajudando empresas de médio e grande porte a acelerarem o cumprimento dos cronogramas (ABCP et al., 2008).

A NBR 16055 (ABNT, 2012) recomenda que seja utilizado o concreto autoadensável (CAA) neste tipo de sistema construtivo, uma vez que este concreto em específico tem como característica a fluidez e a resistência à segregação, fatores estes responsáveis pela minimização das operações de acabamento, além de garantia da boa integridade das arestas, diminuindo retrabalhos.

Alyhya (2017) ressalta que tipos especiais de resíduos industriais ou materiais naturais (também conhecidos como pozolanas) podem ser utilizados em misturas de CAA para substituir parcialmente o cimento com a finalidade de melhorar ou alcançar certas propriedades. Destaca ainda que os principais componentes químicos presentes nos materiais utilizados em substituição ao cimento são o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que reagem lentamente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) levando a formação do silicato de cálcio e hidratos de aluminato. Estas reações, em conjunto com as produzidas pela hidratação do cimento Portland preencherão os vazios, melhorando a durabilidade em longo prazo, reduzindo a retração, fluência, permeabilidade, entrada de cloreto e ataque de sulfato. A contribuição destes materiais para a melhora da resistência está relacionada principalmente à sua atividade pozolânica, que depende das proporções de substituição e de suas propriedades inerentes. A reação pozolânica diminui também a porosidade da zona interfacial melhorando assim a força de adesão entre agregado e pasta. A incorporação bem-sucedida destes materiais no CAA transforma resíduos (subprodutos) ou materiais de baixo valor em recursos valiosos, reduzindo custos, reaproveitando recursos naturais e reduzindo as emissões de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

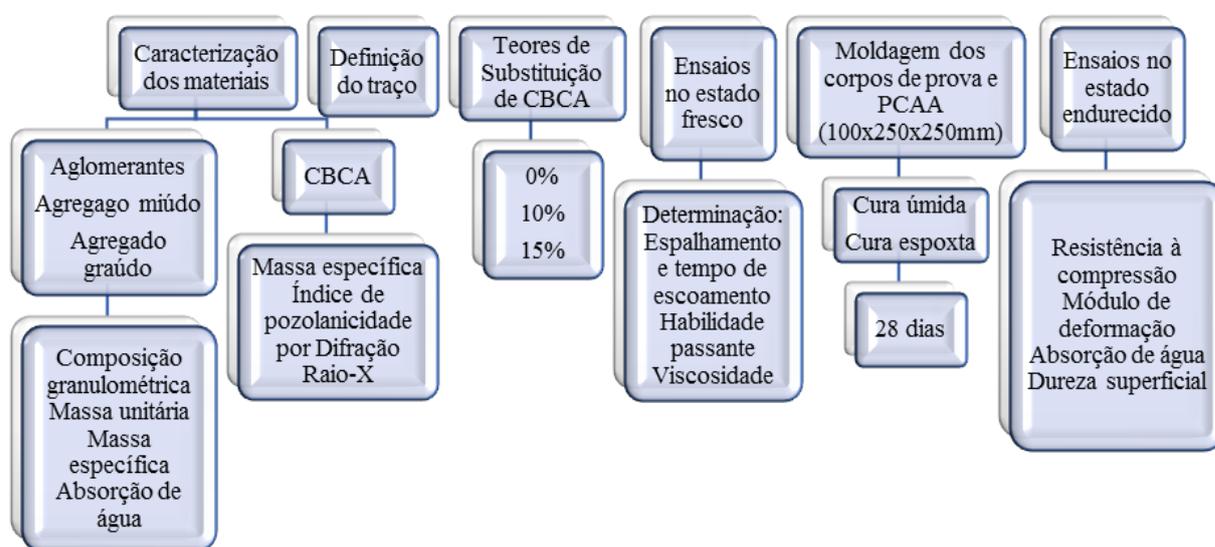
#### **3.1 Planejamento experimental**

O estudo experimental desta pesquisa compreendeu a caracterização física e química da CBCA e teve como objetivo verificar sua pozolanicidade e seu estado amorfo. Ainda, consistiu na produção do concreto autoadensável bem como na moldagem dos corpos-de-

prova e nas amostras das paredes de concreto com o objetivo de verificar a influência da utilização da CBCA em substituição ao cimento Portland no desempenho mecânico de PCAA aos 28 dias.

Desta forma, o planejamento experimental foi definido como demonstrado na Figura 1, permitindo trabalhar com fatores controláveis para que então, através de tratamento estatístico pelo *software* Statistica 8.0, fosse possível avaliar a influência de cada um destes fatores nas variáveis de resposta. Para analisar se os dados que foram obtidos na pesquisa são estatisticamente iguais ou diferentes, determinando quais são as técnicas que oferecem os melhores resultados, se utilizou o método de teste de *Tukey*, que é usado para testar toda e qualquer diferença significativa entre as duas médias de tratamento, ou seja, não permite comparar grupos entre si.

Figura 1 – Planejamento experimental



Fonte: Autor (2019).

### 3.2 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Com o intuito de buscar os objetivos desta pesquisa, foi realizada a substituição do cimento Portland por CBCA em volume, considerando as densidades dos materiais. A cinza utilizada foi de uma cachaçaria localizada no município de Três Arroios/RS, conforme demonstrado na Figura 2. Ao chegar ao laboratório foi posta para secagem em estufa na temperatura de 100°C, pelo período de 24 horas. Após passou por processo de moagem em moinho de bolas por cerca de 6 horas, conforme recomendação pela literatura consultada e posteriormente foi calcinada em Mufla à temperatura de 700°C por 1h. Este processo teve o objetivo de aumentar a quantidade de cinza passível de utilização, uma vez que o processo de moagem aumenta a reatividade da adição.

Figura 2 – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar



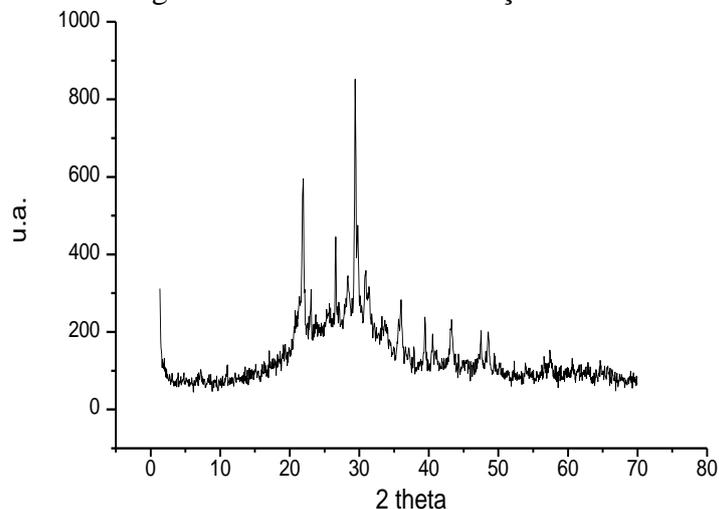
Fonte: Autor (2019).

A caracterização física da CBCA se deu através da determinação da massa específica obtida por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier conforme recomendado pela NBR 16605 (ABNT, 2017). Este parâmetro complementa a caracterização química da CBCA, possibilitando compreender de que maneira a cinza interage com o cimento durante a hidratação, modificando suas propriedades após endurecimento. A cinza utilizada para este estudo apresentou como resultado massa específica no valor de 2,64 g/cm<sup>3</sup>.

Para a caracterização química da CBCA, foi realizada a análise DRX (análise padrão), onde as medidas de difração de Raio-X (DRX) foram conduzidas em um difratômetro convencional (Rigaku – Mini Flex II), operando na geometria convencional de 2 theta, sob as seguintes condições de análise: velocidade de 5°/min ao passo de 0,05; detector de cobre: 1,54 nm; voltagem do detector: 30mA. Esta técnica permite a determinação da composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes em um material e é empregada para caracterização de fases cristalinas presentes na cinza.

Os dados gerados pelo ensaio estão compilados no difratograma observado na Figura 3, onde a Difração de Raio-X obteve como maior resultado que a cinza é amorfa, porém há picos onde se apresentam fases cristalinas de sílica. A amorficidade da cinza está relacionada com a sua atividade pozolânica, que é diretamente proporcional à área específica e depende da composição química do material. Desta forma, materiais com estrutura desordenada (amorfa) apresentam maior reatividade em comparação com materiais cristalinos.

Figura 3 – Resultado da difração de Raio-X



Fonte: Autor (2019).

### 3.3 Dosagem do concreto

A Tabela 1 apresenta os traços utilizados na dosagem do concreto, sendo adotado o traço 1:6 com relação água/cimento igual a 0,65, uma vez que este atendeu à resistência desejada (30 MPa) com menor consumo de cimento. Para o desenvolvimento do traço, optou-se por fixar a substituição do cimento, pela sílica ativa, em um teor de 10%, e o uso do aditivo foi fixado em um teor de 1%, baseado nas recomendações dos fabricantes em conjunto com os estudos abordados para a elaboração do traço.

Tabela 1 – Traços utilizados para a dosagem do CAA

Traços	$\alpha$	Traço Unitário			Slump (mm)	Aditivo (%)	Consumo de Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	Resistência	
		C	a	P					Fcj (MPa)	a/c
3,5	0,50	1	1,25	2,25	120	1	490,07	0,096	33,35	0,43
6	0,50	1	2,50	3,50	100	1	314,69	0,093	36,9	0,65
6,5	0,50	1	2,75	3,75	100	1	294,65	0,091	20,43	0,68

Fonte: Autor (2019).

Posteriormente a escolha do traço elaborou-se concretos com substituições de cinza do bagaço da cana-de-açúcar pelo cimento nos teores de 10% e 15%, além de um concreto de referência. Para as concretagens os materiais utilizados foram: Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV – ARI), areia fina natural, brita 0, água, aditivo superplastificante, sílica ativa e cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

A mistura foi realizada com o intuito de avaliar as propriedades do concreto no estado fresco por meio dos ensaios de aceitação para o CAA: Determinação do Espalhamento e do Tempo de Escoamento (Método do Cone de Abrams) pela NBR 15823/2 (ABNT, 2010), Determinação da Habilidade Passante (Método da caixa L) através da NBR 15823/4 (ABNT, 2010) e a Determinação da Viscosidade (Método do funil V) por meio da NBR 15823/5 (ABNT, 2010). Onde ambos os concretos produzidos respeitaram suas respectivas normas. Ainda, avaliar as propriedades do CAA no estado endurecido, o qual foi realizado após a cura (úmida e exposta) na idade de 28 dias.

### 3.4 Métodos de ensaios no estado endurecido: Ensaios mecânicos e de durabilidade

Para a realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial foi utilizada a NBR 5739 (ABNT 2007), que prescreve um método pelo qual devem ser ensaiados à compressão os corpos de prova cilíndricos de concreto. Para a realização deste ensaio foram necessários os corpos de prova e uma prensa hidráulica que imponha uma força de compressão sobre os mesmos.

O ensaio de módulo de deformação/elasticidade seguiu as prescrições da NBR 8522 (ABNT 2008), que especifica um método para a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, do concreto endurecido, em corpos-de-prova cilíndricos que podem ser moldados ou extraídos da estrutura.

O ensaio de adsorção de água por capilaridade no concreto seguiu as especificações da NBR 9779 (ABNT 2012), a qual prescreve o ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade de argamassas e concretos endurecidos.

Por fim, para o ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão foi utilizada a NBR 7584 (ABNT, 2012), tem-se como objetivo medir a dureza superficial do

concreto, fornecendo elementos para a avaliação da qualidade do concreto endurecido. O ensaio foi realizado em fôrmas de 250x250x100mm simulando paredes de concreto. A seguir na Figura 4, os ensaios no estado endurecido.

Figura 4 – Ensaios mecânicos e de durabilidade



a) Resistência à compressão; b) Módulo de deformação; c) Absorção de água; d) Dureza superficial.

Fonte: Autor (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resistência à compressão uniaxial

Os resultados médios de resistência à compressão uniaxial, o desvio padrão e o coeficiente de variação para os concretos avaliados, exibem-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados médios da resistência à compressão uniaxial

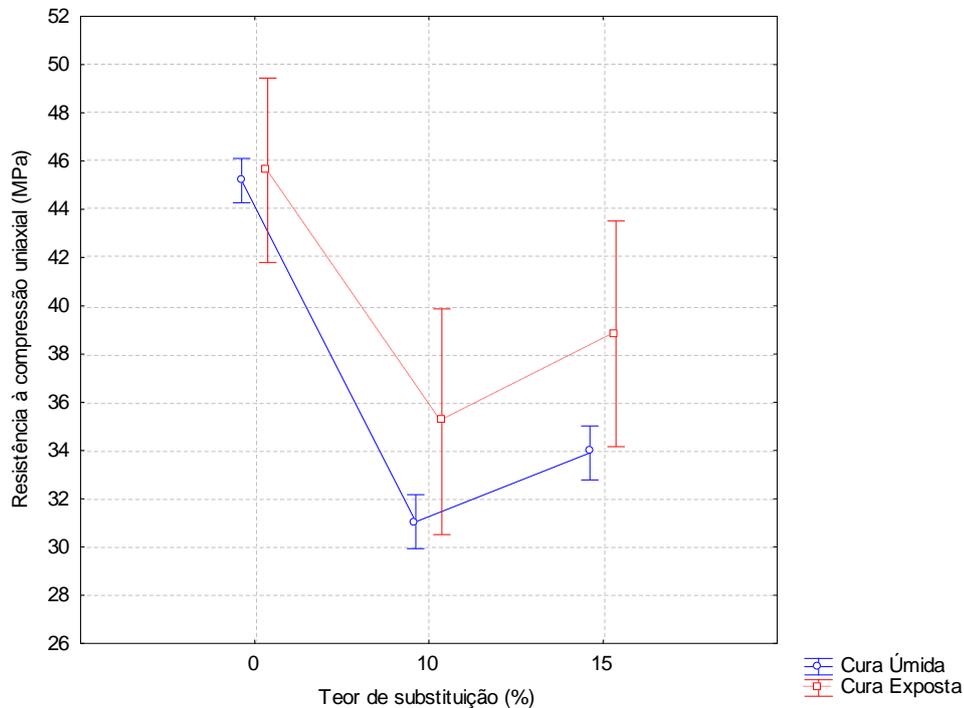
Teor de substituição (%)	Cura	Resistência à compressão uniaxial média (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0	Úmida	45,19	0,35	0,77
0	Exposta	45,62	1,05	2,31
10	Úmida	30,49	2,90	9,06
10	Exposta	35,19	2,39	6,84
15	Úmida	33,90	0,76	2,25
15	Exposta	38,84	3,97	10,21

Fonte: Autor (2019).

Avaliando os resultados obtidos com a cura úmida, pode-se perceber que a resistência à compressão uniaxial média para o teor de 10% obteve um decréscimo de 32,53% e para o teor de 15% uma redução de 24,98%, quando comparados com o teor de referência (0%). Para os resultados encontrados com cura exposta, percebem-se quedas nas resistências médias dos teores de 10% e 15% em 22,86% e 14,86%, perante o referência.

A seguir no Gráfico 1, nota-se o efeito combinado das curas com os teores de substituições de CBCA sobre a resistência à compressão uniaxial.

Gráfico 1 – Resistência à compressão uniaxial: Efeito combinado das curas com os teores de substituições



Fonte: Autor (2019).

Analisando o Gráfico 1, pode-se perceber que os tipos de cura não interferiram na resistência à compressão dos concretos. Todavia, nota-se que os concretos submetidos à cura úmida obtiveram resistências mais baixas. Pode-se justificar esta queda na resistência à compressão dos concretos realizados com cura úmida, pela relação a/c utilizada para produção do traço, que foi de 0,65. Pois a cura úmida é ideal para concretos de baixa relação a/c no ganho de resistência, proporcionando grande desenvolvimento ao concreto (BRESOLIN, 2016).

Ainda, percebe-se que o teor de 10% obteve resultados inferiores ao percentual de substituição de 15%. Sampaio et al. (2014) avaliariam a influência da CBCA no comportamento mecânico de concretos para substituições de 10, 20 e 30%. Observou-se que todos os concretos com CBCA mostram-se eficazes em termos de resistência, porém o concreto com 10% de adição de CBCA se mostrou pouco eficiente em relação aos demais teores. Elucida-se quanto à possibilidade de a resistência do concreto no estudo em questão ter diminuído em relação ao traço referência devido a uma junção de dois fatores principais: baixa reatividade da CBCA aos 28 dias e teor de substituição deficiente para a matriz porosa estudada.

Por meio do teste de *Tukey*, pode-se dizer que o melhor resultado obtido para a resistência à compressão foi para o teor de 15% com cura exposta, onde se apresentou estatisticamente igual ao concreto de referência e ao teor de 10% (ambos em cura exposta). Porém o teor de 10% com cura exposta mostrou-se distinto do referência. Já para os concretos que foram submetidos à cura úmida, as substituições de 10 e 15% expressaram-se diferentes entre si e do referência.

## 4.2 Módulo de deformação

Os resultados médios de módulo de deformação, o desvio padrão e o coeficiente de variação para os concretos estudados, apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados médios do módulo de deformação

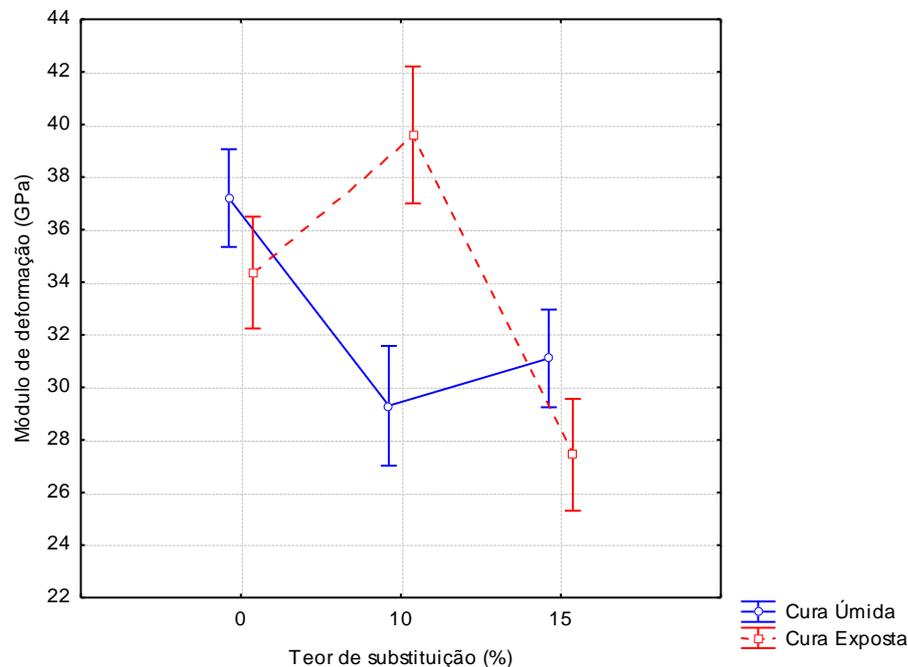
Teor de substituição (%)	Cura	Módulo de deformação média (GPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0	Úmida	37,20	1,47	3,96
0	Exposta	34,36	1,09	3,19
10	Úmida	29,30	0,14	0,48
10	Exposta	40,03	1,10	2,93
15	Úmida	31,10	1,32	4,25
15	Exposta	27,43	1,40	5,12

Fonte: Autor (2019).

Analisando os resultados obtidos em cura úmida, notam-se decréscimos no módulo de deformação para os teores de 10% e 15% em 21,23% e 16,39%, ambos comparados com o teor de referência. Logo, para a cura exposta, percebe-se que ocorreu um acréscimo no módulo para o teor de 10% em 16,50%, já para o teor de 15% houve uma redução de 20,16%, quando comparados ao teor de referência.

O efeito combinado das curas com os teores de substituições de CBCA sobre o módulo de deformação, expõem-se no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Módulo de deformação: Efeito combinado das curas com os teores de substituições



Fonte: Autor (2019).

Ao examinar o Gráfico 2, percebe-se que apenas para a substituição de 10% houve interferência do tipo de cura. A cura exposta, por si só, prejudica a hidratação do compósito quando este passa pelo processo de forma “natural” sem a presença de agentes adsorptivos como a CBCA. Pitta *et al.* (2004) salienta que para que a hidratação se processe de forma

conveniente é essencial manter a massa em condições ótimas de umidade e de temperatura. O Gráfico 2 reflete esta afirmação pois, como pode ser observado, para o compósito sem a presença de agentes adsortivos o resultado obtido segue como esperado, apresentando melhores efeitos para a cura úmida do que para a exposta.

Entretanto, quando o agente adsortivo (CBCA) é adicionado ao compósito (em 10%), os corpos de prova submetidos à cura exposta passam pelo processo de cura interna, fazendo que o processo de hidratação ocorra naturalmente “de dentro para fora”, enquanto que, os corpos de prova submetidos à cura úmida, devido ao alto teor de a/c associado com o poder adsortivo das partículas de CBCA provoca a saturação interna e externa do compósito, prejudicando desta forma certas propriedades mecânicas.

Ainda analisando *Tukey*, tanto na cura úmida quanto na exposta, os percentuais de 10 e 15% mostram-se diferentes do concreto de referência.

### 4.3 Absorção de água por capilaridade

Os resultados médios do índice de absorção de água por capilaridade, o desvio padrão e o coeficiente de variação para os concretos estudados, encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados médios do ensaio de índice de absorção de água por capilaridade

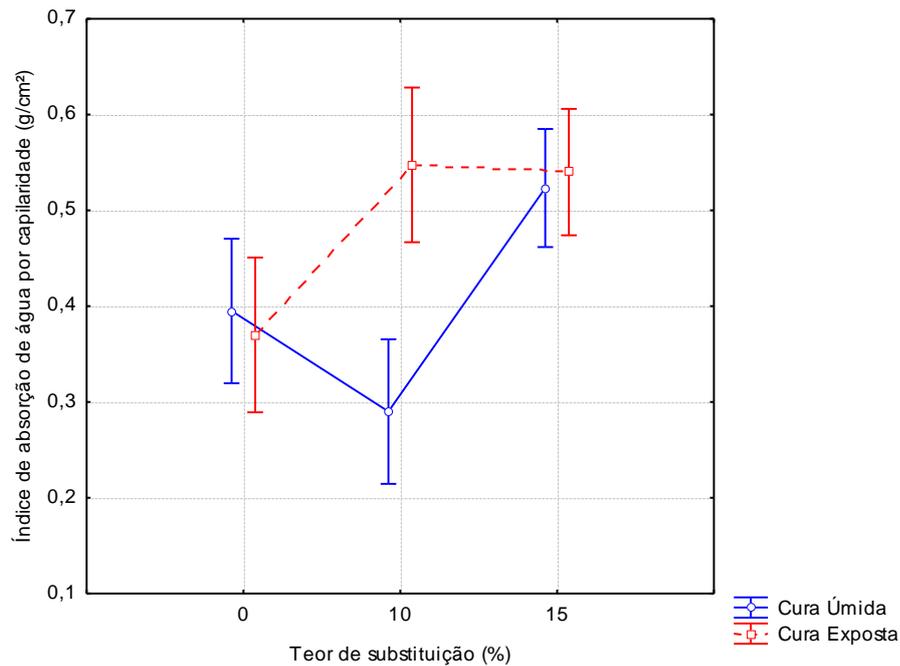
Teor de substituição (%)	Cura	Absorção de água média 72h (g/cm <sup>2</sup> )	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
0	Úmida	0,42	0,05	12,74
0	Exposta	0,37	0,05	14,63
10	Úmida	0,29	0,007	24,90
10	Exposta	0,55	0,012	20,00
15	Úmida	0,53	0,01	2,79
15	Exposta	0,54	0,01	2,71

Fonte: Autor (2019).

A partir da Tabela 4, percebe-se que para a cura úmida houve um decréscimo no teor de 10% em 30,95% na absorção de água, já para o teor de 15%, ocorreu um acréscimo de 26,19%, quando comparados ao concreto de referência. Analisando a cura exposta, nota-se o aumento nas absorções para os teores de 10% e 15%, em 48,64% e 45,94%, ambos em relação ao teor de referência.

O efeito combinado das curas com os teores de substituições de CBCA sobre a absorção de água por capilaridade dos concretos, apresenta-se no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Absorção de água: Efeito combinado das curas com os teores de substituições



Fonte: Autor (2019).

Avaliando o Gráfico 3, percebe-se que o tipo de cura não influenciou na absorção de água dos concretos com teores de 15% e 0% (referência), porém interferiu na substituição de 10%. Isso se deve a combinação do alto teor de a/c da mistura com a capacidade adsorvente da cinza do bagaço da cana-de-açúcar uma vez que, segundo Bonassa (2017), as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, assim como o carvão ativado, possuem estrutura porosa e mesoporosidades, fatores estes que podem influenciar positivamente na adsorção, como o ocorrido em cura úmida para a substituição de 10%.

Em contrapartida, tal comportamento não foi observado para os corpos de prova submetidos à cura exposta, uma vez que, ocorrendo apenas o processo de cura interna, sem a presença externa constante de umidade a absorção de água por capilaridade aumentou, indo de encontro ao relatado por Mendes (2015) que observou que concretos autoadensáveis apresentam elevada porcentagem de pasta, tornando o material mais poroso e higroscópico.

O referido autor observou ainda que as composições que apresentaram maior quantidade de pasta apresentaram também, maior valor de absorção e que este valor diminuiu com a diminuição do valor da relação a/c, tornando a pasta mais rica e impermeável.

Ainda, nota-se que para o teor de 15% nos dois tipos de cura (úmida e exposta) houve um elevado acréscimo na absorção, o qual pode ser justificado pela cinza apresentar maior porosidade em suas partículas. Quanto maior a porosidade maior será a quantidade de água absorvida e, conseqüentemente, menores as resistências (FIORITI, 2007).

Segundo Tukey, o percentual de 10% de CBCA com cura úmida foi o que apresentou o melhor desempenho frente à absorção de água, sendo estatisticamente igual ao concreto de referência com cura úmida.

#### 4.4 Dureza superficial

Os resultados médios da avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão dos concretos estão apresentados a seguir na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados médios do ensaio de dureza superficial

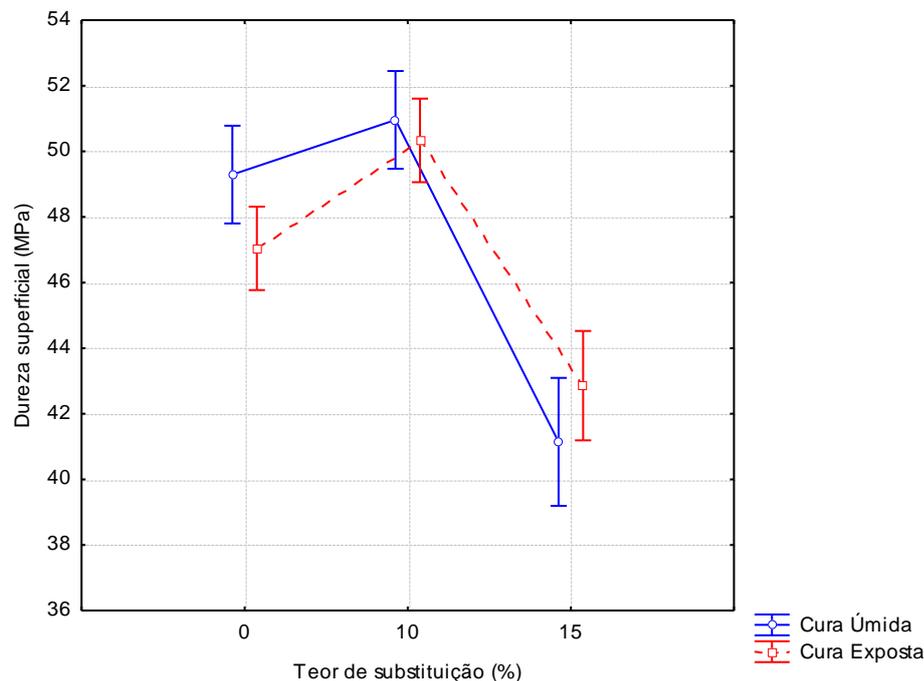
Teor de substituição (%)	Cura	Dureza superficial média (MPa)
0	Úmida	48,96
0	Exposta	47,04
10	Úmida	50,87
10	Exposta	50,33
15	Úmida	41,14
15	Exposta	42,75

Fonte: Autor (2019).

Por meio dos resultados obtidos no ensaio de avaliação da dureza superficial, sabe-se que para a cura úmida, houve um aumento na dureza superficial dos concretos com teor de 10% em 3,90%, já para o teor de 15% ocorreu uma redução de 15,97%, comparados ao teor de referência. Para a cura exposta, obteve-se um aumento no valor da dureza superficial no teor de 10% em 7,00%, entretanto para o teor de 15% ocorreu uma redução de 9,12%, ambos em relação ao concreto de referência.

No Gráfico 4, apresenta-se o efeito combinado das curas com os teores de substituições de CBCA sobre a dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão dos concretos.

Gráfico 4 – Avaliação da dureza superficial: Efeito combinado das curas com os teores de substituições



Fonte: Autor (2019).

Observando o Gráfico 4, sabe-se que as curas (úmida e exposta) não interferiram na avaliação da dureza superficial dos concretos. Segundo Qasrawi (2000), os principais fatores que influenciam os resultados da dureza superficial do concreto pelo esclerômetro de reflexão são o tipo de agregado, o acabamento da superfície, proporcionamento do concreto, inclinação do esclerômetro, carbonatação, idade, umidade e tipo de cimento. As condições de umidade do concreto podem ser afetadas pelo método de cura adotado (EVANGELISTA, 2002).

Pode-se perceber uma considerável melhora no índice esclerométrico efetivo para os concretos que continham teor de 10% de CBCA em sua composição, isso pode ser explicado pela elevada exsudação observada no processo de concretagem que resultou no afloramento da cinza (em decorrência de sua baixa densidade) junto com a pasta de cimento fazendo com que, ao reagir com a água de exsudação, a CBCA oferecesse maior resistência à superfície da placa.

Os resultados obtidos neste ensaio quando comparados aos resultados de compressão uniaxial evidenciam a ineficiência deste ensaio para a determinação da compressão do concreto, por outro lado, revelam que o teor de substituição utilizado influencia nas propriedades de superfície.

Ainda por meio do teste de *Tukey*, pode-se dizer que o melhor resultado de dureza superficial foi para o teor de 10% com cura úmida, mostrando-se estatisticamente igual ao concreto de referência.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, buscou-se analisar a influência da utilização da CBCA nas propriedades mecânicas do CAA, quando utilizado em paredes de concreto moldadas *in loco*. A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados e posterior tratamento dos dados, foi possível apresentar as conclusões verificadas para as variáveis de resposta estudadas.

Em relação à resistência à compressão uniaxial, os compósitos que continham a CBCA em sua matriz apresentaram menor resistência do que o concreto de referência. Porém, por meio da análise do teste de *Tukey*, os concretos com 15% em cura exposta mostraram-se estatisticamente igual ao referência, ou seja, podendo ser feita a substituição sem perda significativa da resistência. Já para o teor de 10%, pode-se explicar a queda na resistência pela baixa pozolanicidade ocorrida aos 28 dias desse percentual de cinza, além da alta porosidade da mistura o que impediu a ocorrência do efeito *filler*.

Quanto ao módulo de deformação, o concreto com presença da CBCA em 10% com cura exposta apresentou melhores resultados do que a cura úmida e do que o teor de 15% (tanto com cura úmida, quanto exposta), uma vez que, devido ao poder adsorptivo da CBCA, os fatores externos não prejudicaram a hidratação da matriz, já que este ocorre de dentro para fora devido ao processo de cura interna. Entretanto, por meio da análise de *Tukey*, os teores de 10 e 15% são consideravelmente diferentes do referência.

Em relação à absorção de água por capilaridade, os concretos produzidos com 10% de CBCA em cura úmida foram os que obtiveram os melhores resultados, uma vez que o efeito simultâneo do elevado teor a/c do compósito com o poder de adsorção das partículas da CBCA contribuiu para essa menor absorção.

Em relação às paredes de concreto moldadas *in loco* os resultados obtidos neste estudo foram relevantes uma vez que, apesar da resistência à compressão uniaxial do concreto com CBCA ter sido inferior à analisada para o concreto de referência, ela atendeu à resistência necessária para a utilização em PCAA, ficando acima dos 30 MPa requeridos em norma.

Contudo, é possível concluir que a substituição parcial do cimento Portland por CBCA no teor de 10% não apresentou índice de pozolanicidade e nem efeito *filler* suficiente aos 28 dias para que houvessem ganhos de resistência mecânica importantes para a matriz. Além de que, a re-calcinação do material provocou aumento na porosidade dos teores de 10 e 15%, o que, aliado ao alto teor a/c foi responsável por boa parte dos resultados obtidos. Infere-se ainda que a alta porosidade da CBCA favoreceu o processo de cura interna dos compósitos.

Por fim, presume-se que a introdução de cinza do bagaço de cana-de-açúcar possa ser considerada um material alternativo para a produção de concreto, porém recomenda-se submeter os concretos com CBCA a um maior tempo de cura, para avaliar o efeito pozolânico e a reatividade da cinza nos compósitos. Esperando assim, bons resultados com a aplicação da

mesma, bem como, disseminar o uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e contribuir diretamente para a diminuição de impactos ambientais, como a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

## REFERÊNCIAS

ALYHYA, W. S. S. **Self-compacting concrete: mix proportioning, properties and its flow simulation in the v-funnel**. 2016. 312 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia da Universidade de Cardiff, Cardiff, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM; INSTITUTO BRASILEIRO DE TELAS SOLDADAS. **Parede de Concreto: coletânea de ativos 2007/2008**. São Paulo, 2008.

Disponível em:

<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/9/anexo/colpc0708.pdf>. Acessado em: abr 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7584: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823/2: Concreto auto adensável: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823/4: Concreto auto adensável: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823/5: Concreto auto adensável: Determinação da viscosidade - Método do funil V**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 16055: Paredes de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações – Requisitos e Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

BAHURUDEEN, A. *et al.* Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 59, p.77-88, 2015. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>.

BONASSA, G. **Aplicação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material adsorvente na purificação de óleo residual**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

BRESOLIN, G. **Influência das técnicas de cura na resistência do concreto e análise da incorporação de cal hidratada na técnica de cura por aspersão periódica de água**. Trabalho de Conclusão de curso - UNIVATES, Lajeado, 2016.

CASTALDELLI, V. N. *et al.* Concreto com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Canela, 2010. Anais... Canela: ENTEC, 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2017/2018**. Brasília, p. 77, 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acessado em: maio 2018.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. SBPE – Sociedade Brasileira de Planejamento Energético – **Revista Brasileira de Energia**, Vol. 2 - n° 2, 1992.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013, 265f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FIORITTI, C. F. **Pavimentos intertravados do concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007.

MENDES, M. V. A. S.; BAUER, E.; SILVA, F. G. S. Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadesável. **Revista Matéria**, v. 22, n.4, 2017.

PAIXÃO, C. A. B. **Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PAULA, M. O. de. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PAULA, M. O.; TINOCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.3, 2009.

PITTA, M. R.. Cura de Pavimentos de Concreto. *Techné*, São Paulo, v. 88, 2004. Disponível em: <http://techn17.pini.com.br/engenharia-civil/88/artigo286306-1.aspx>. Acessado em: 25 nov. 2018.

QASRAWI, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concrete Research**, 2000.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 e SP816949**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SAMPAIO, Z. L. M. et al. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, Natal, Rn, v. 7, n. 4, p.626-647, ago. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/riem/v7n4/06.pdf>. Acessado em: 23 nov. 2018.

SOUSA, L. R. L. de. **Viabilidade do uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residuais do estado de Goiás como adição mineral ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S.R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**. v.92, n.10, p.2774-2780, 2011.



# REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

**Douglas Dutra Macieira<sup>(1)</sup>; João Paulo Campelo Gomes<sup>(2)</sup>; Grazielle Tigre de Souza<sup>(3)</sup>**

(1) Universidade Federal do Pará/UFPA – douglasdutra172@gmail.com; (2) Universidade Federal do Pará/UFPA – jp023cqc@gmail.com; (3) Universidade Federal do Pará/UFPA – grazielle\_tigre@hotmail.com

## RESUMO

A busca pela preservação ambiental vem fazendo com que iniciativas de reutilização de resíduos sejam mais difundidas. Nesse viés, este trabalho propõe a substituição, em argamassas, da areia, retirada de jazidas naturais, pelo resíduo de Poliestireno Expandido (EPS), a fim de promover a reutilização deste material. Com este estudo foi possível avaliar o comportamento da argamassa com adição de EPS no estado fresco. Observou-se que a uma queda na resistência mecânica das argamassas com substituição, mas também um aumento na trabalhabilidade, visível na diminuição da densidade e aumento da consistência. Por fim, através da avaliação dos dados, observou-se que o traço com substituição de 25% apresentou os melhores resultados, com aumento na trabalhabilidade sem perdas acentuadas de resistências mecânica.

**Palavras-chave:** argamassa; revestimento; EPS.

## REPRODUCTION OF EXPOSED POLYSTYRENE RESIDUE (EPS) IN THE PRODUCTION OF COATING GROUT

### ABSTRACT

The search for environmental preservation has been making waste reuse initiatives more widespread. In this bias, this work proposes the replacement, in mortars, of the sand, extracted from natural deposits, by the residue of Expanded Polystyrene (EPS), in order to promote the reuse of this material. With this study it was possible to evaluate the behavior of the mortar with addition of EPS in the fresh state. It was observed that a decrease in the mechanical resistance of the mortars with replacement, but also an increase in the workability, visible in the decrease of the density and increase of the consistency. Finally, through the evaluation of the data, it was observed that the trait with substitution of 25% presented the best results, with increase in workability without marked losses of mechanical resistance.

**Key-words:** mortar; coating; EPS.



## 1. INTRODUÇÃO

O cenário da construção civil nos últimos anos se apresenta como um dos setores da atividade econômica em desenvolvimento, tornando-se um grande consumidor de materiais naturais e artificiais em seus empreendimentos. Entre os materiais naturais usados estão a areia, seixo e brita, que vem sendo retirados da natureza ao longo da história da humanidade. Assim sendo, destacam-se grandes problemas gerados, enfatizando o descarte de rejeitos na natureza e a retirada de materiais do meio ambiente bem como a crescente exigência mundial por soluções adequadas para o descarte dos resíduos humanos. Com isso observa-se a necessidade da realização de avaliações dos materiais descartados e suas possíveis reutilizações.

Referente ao Poliestireno Expandido (EPS), Dos Santos (2008) <sup>(1)</sup> enfatiza que este material se trata de um plástico rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz nos laboratórios da Basf, na Alemanha. A utilização do material EPS industrialmente hoje abrange uma grande gama de aplicações. Sendo empregado desde a agricultura até a construção civil, passando pela indústria de embalagens de eletroeletrônicos, alimento e bebidas, fármacos, utilitários e decorativos (DOS SANTOS, 2008) <sup>(1)</sup>.

Neste trabalho o resíduo de EPS foi utilizado em argamassa de cimento, com o propósito de substituir o agregado natural comumente utilizado, a areia, a fim de verificar o comportamento em relação às características da mistura (peso, resistência mecânica, retenção de água, consistência, etc.) e avaliar a viabilidade técnica da utilização deste resíduo na produção de argamassas.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Para a produção da argamassa, foi utilizado cimento do tipo CP IV 32 RS, sendo este mais comumente utilizado na região de estudo. O agregado miúdo utilizado foi a areia natural proveniente do leito do Rio Tocantins e os resíduos de EPS, que foram coletados em depósitos de lojas espalhadas pelo município de Tucuruí-PA, os quais foram submetidos ao processo de separação e beneficiamento para utilização na presente pesquisa.

### 2.2. Métodos

Para realização da caracterização dos agregados foi feita a coleta e o quarteamento dos materiais seguindo os parâmetros de ABNT NBR NM 26/2000<sup>(2)</sup>, logo após, realizou-se o ensaio de distribuição granulométrica (ABNT NBR NM 248/2001)<sup>(3)</sup> e determinação da massa unitária e massa específica (ABNT NBR NM 45/2006)<sup>(4)</sup>. Vale destacar que em relação à massa específica do EPS utilizou-se o valor proposto por Fontoura (2017)<sup>(5)</sup>, uma vez que não foi possível obter experimentalmente.

Após a caracterização dos agregados a serem utilizados, iniciou-se a preparação dos traços das argamassas. Para a argamassa de referência, foi utilizado o traço 1:3 (cimento: areia) em volume com fator água/cimento de 0,6. Com base nos dados dos materiais empregados, foi possível calcular os consumos de cimento, areia e EPS para os teores de substituição de areia utilizados (0%, 25%, 50% e 100%), mantendo o mesmo fator água/cimento para todos os traços.

Para avaliar o desempenho das argamassas, todos os traços foram submetidos aos ensaios no estado fresco e no estado endurecido, a fim de comparar suas propriedades e classificar as argamassas, de acordo com os resultados obtidos.

No estado fresco, foram realizados os ensaios de retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado e consistência de argamassa.

O ensaio de retenção de água foi realizado respeitando a metodologia descrita na norma ABNT NBR 13277/2005<sup>(6)</sup>, sendo analisado o potencial de retenção de água nas argamassas, representado em porcentagem.



Os ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado foram realizados de acordo com a ABNT NBR 13278/2005<sup>(7)</sup>.

O ensaio de consistência de argamassa foi realizado conforme a metodologia descrita na ABNT NBR 13276/2016<sup>(8)</sup>, executando a medição do espalhamento de cada traço de argamassa, com o objetivo de verificar a trabalhabilidade das argamassas.

No estado endurecido, as argamassas foram caracterizadas, aos 7 e 28 dias, quanto a resistência à flexão e resistência à compressão, obedecendo os parâmetros da ABNT NBR 13279/2015<sup>(9)</sup>. Para realizar esses ensaios inicialmente foram produzidos 6 corpos de prova, para cada traço, no formato 4cm x 4cm x 16 cm, sendo 3 corpos para cada idade. Após a cura os corpos de prova foram submetidos aos ensaios.

Para classificação das argamassas, foram utilizados os parâmetros presentes na ABNT NBR 13281/2005<sup>(10)</sup>, onde constam os índices para a indicação da classe de cada uma das argamassas e a partir dos dados obtidos nos ensaios foi possível fazer a devida classificação.

Todas as etapas de realização do presente estudo foram realizadas no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará - Campus Tucuruí.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para a caracterização dos agregados utilizados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos agregados.

Agregado	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Areia	1,63	3,98	1,18	2,60
EPS	0,015	6,59	0,30	0,46

A partir da caracterização dos agregados realizou-se a dosagem e produção das argamassas. Na Figura 2 pode-se observar o aspecto com as seguintes composições: 0%, 25%, 50% e 100% de substituição da areia pelo resíduo de EPS.

Figura 2 – Argamassas com substituição de 0%, 25%, 50% e 100%,



Os ensaios das argamassas no estado fresco indicam além trabalhabilidade, característica ligada a facilidade no manuseio da argamassa, outras características importantes como a densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água, dados que podem ser observados na Tabela 2, para cada um dos traços produzidos.



Tabela 2 – Ensaio de argamassa no estado fresco.

TRAÇOS	Consistência (mm)	Retenção de água (%)	Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
Referência	257,67	97,80	2,15	2,74
25%	285,67	98,11	1,97	7,16
50%	289,67	97,56	1,73	14,46
100%	208,33	97,69	1,06	35,22

Conforme os resultados apresentados na Tabela 2, em relação à consistência, propriedade a qual determina a facilidade de aplicação da argamassa, observa-se que a substituição de 25% apresentou um incremento significativo na consistência da mistura em comparação a mistura de referência. Com o aumento da substituição para 50% obteve-se ainda um aumento no índice de consistência. Porém com a substituição de 100% teve um espalhamento bem inferior em relação à argamassa de referência.

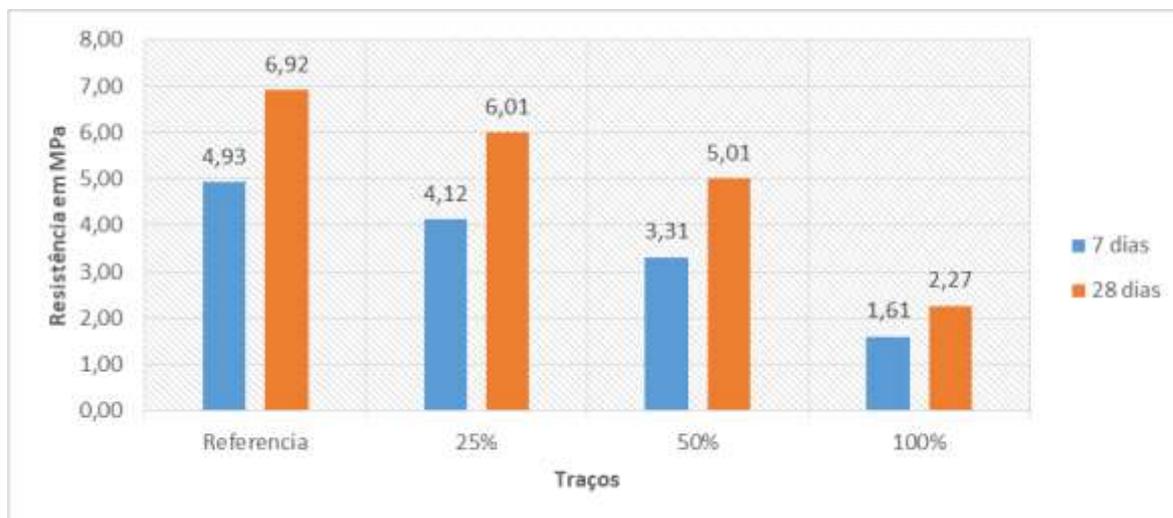
Em relação aos valores de densidade de massa e teor de ar incorporado estes apresentaram comportamento progressivo em relação ao aumento da substituição do resíduo de EPS, observando assim que a substituição da areia pelo EPS tem reflexo direto no peso da argamassa. Observa-se também o aumento significativo do teor de ar incorporado conforme o incremento de resíduo de EPS na mistura, sendo que a mistura com 100% de substituição apresentou 35,22% de teor de ar incorporado.

Os valores de retenção de água apresentaram variações descontínuas, o traço com substituição de 25% apresentou uma retenção maiores que o traço de referência e os demais traços não seguiram essa tendência, apresentado números inferiores ao próprio traço de referência.

O ensaio de resistência à flexão demonstra o comportamento mecânico de uma argamassa, quando submetida a uma carga localizada no ponto médio do comprimento do corpo de prova, através de um valor médio obtido, tais como os expostos no Gráfico 1 para as idades indicadas.



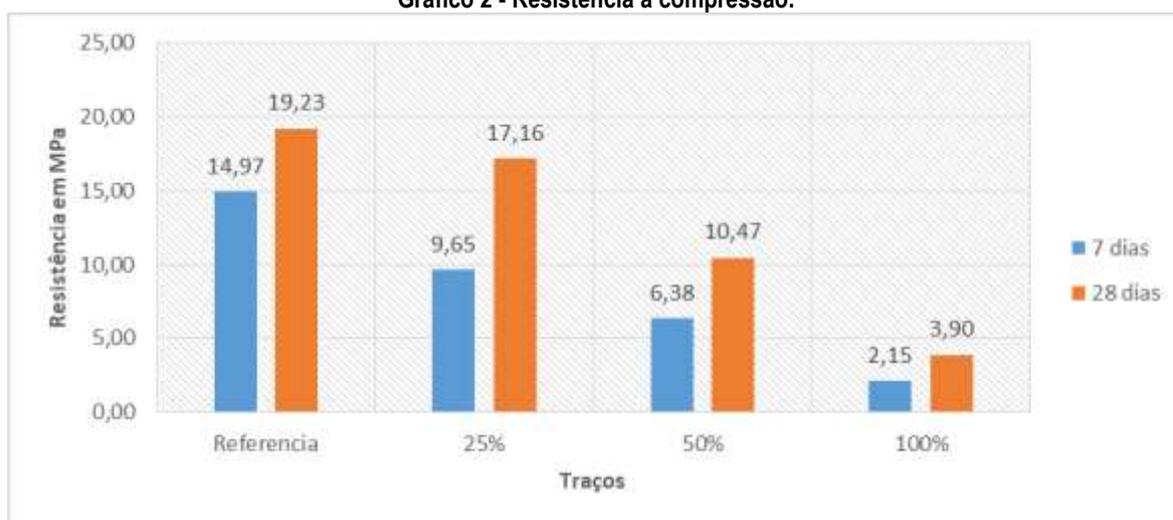
Gráfico 1 - Resistência à flexão



A resistência à tração na flexão dos corpos de provas no período de 28 dias obteve uma diminuição da resistência, ou seja, conforme o incremento de resíduo de EPS a resistência à tração na flexão diminuiu, sendo que a substituição de 100% apresentou maior perda de resistência em relação a argamassa de referência, atingindo apenas 2,265 MPa.

O Gráfico 2 mostra os resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa de referência e com substituição de areia pelo resíduo de EPS.

Gráfico 2 - Resistência à compressão.





Os resultados do ensaio de compressão também indicaram o comportamento esperado dos corpos de prova, com o declínio da resistência em consequência da substituição da areia pelo EPS, mas observando o desempenho nas duas idades identificadas, percebe-se um ganho significativo de resistência na argamassa com substituição de 25%, comparando os resultados de 7 e 28 dias.

Destaca-se ainda que, as amostras com 50% e 100% apresentaram uma queda mais expressiva nos valores de resistência a compressão, atingindo valores de 10,469 MPa e 3,899 MPa respectivamente. Esses resultados podem ser atribuídos ao aumento da quantidade de polímero EPS, o qual possui características hidrofóbicas. Desta maneira, provavelmente as amostras com maiores quantidades de resíduo tendem a apresentar maior quantidade de água livre, afetando assim os valores de resistência das argamassas.

Em posse dos dados expostos, foi possível classificar as argamassas preparadas. Todos os requisitos de classificação apresentam 6 classes próprias e o critério utilizado para a classificação é a indicação do intervalo em que os dados estão situados. Na ABNT NBR 13281/2015<sup>(10)</sup>, as classificações ocorrem em ordem crescente, conforme mostrado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Classificação das argamassas, segundo ABNT NBR 13281/2015<sup>(10)</sup>**

Resistência a compressão	Resistência a tração na flexão	Retenção de água	Densidade de massa g/cm <sup>3</sup>
P1 ( $\leq 2,00$ )	R1 ( $\leq 1,5$ )	U1 ( $\leq 78$ )	D1 ( $\leq 1,4$ )
P2 (1,2 a 3,0)	R2 (1,0 a 2,0)	U2 (72 a 85)	D2 (1,2 a 1,6)
P3 (2,5 a 4,5)	R3 (1,5 a 2,7)	U3 (80 a 90)	D3 (1,4 a 1,8)
P4 (4,0 a 6,5)	R4 (2,0 a 3,5)	U4 (86 a 94)	D4 (1,6 a 2,0)
P5 (5,5 a 9,0)	R5 (2,7 a 4,5)	U5 (91 a 97)	D5 (1,8 a 2,2)
P6 (8,0)	R6 ( $> 3,5$ )	U6 (95 a 100)	D6 ( $> 2$ )

**Tabela 5- Classificação das argamassas.**

TRAÇOS	R. Compressão	R. Flexão	Retenção de água	Densidade E. Fresco
Referência	P6	R6	U6	D6
25%	P6	R6	U6	D5
50%	P6	R6	U6	D4
100%	P3	R4	U6	D1



Com base nas classificações mostradas é possível observar que as argamassas de referência e as argamassas com substituição de 25% e 50% apresentam maior variabilidade de aplicação, sendo relacionado ao comportamento das argamassas. Caracterizando assim maior versatilidade quanto sua utilização, por apresentarem características melhores, cabendo ao usuário escolher a sua aplicação exata, considerando o local e seus objetivos. A argamassa com substituição de 100% teve classificações menos expressivas, apresentando assim maiores limitações de aplicação.



## 4. CONCLUSÃO

Através da análise do comportamento dos traços executados, foi possível verificar o comportamento das argamassas, perante a substituição da areia pelo EPS. Com o auxílio da ABNT NBR 13281/2015<sup>(10)</sup>, foi possível ainda realizar a classificação das argamassas analisadas e com isso é possível atestar suas qualidades. As argamassas de referência e com substituições de 25% e 50%, apresentam aplicabilidade maior que a argamassa com substituição de 100%, ou seja, apresentam maior versatilidade quanto sua utilização, por apresentarem características melhores, cabendo ao usuário escolher a sua aplicação exata, considerando o local e seus objetivos.

Com o desenvolvimento dessa argamassa, cria-se um meio alternativo para a redução de resíduos de EPS descartados de maneiras inadequadas no meio ambiente. Apresenta-se, assim, uma possibilidade amenizadora de impactos ambientais causados pelas atividades desenvolvidas na indústria da construção civil, uma vez que a argamassa proposta agrega grande volume de resíduos, além de substituir parte dos agregados extraídos das reservas naturais, preservando assim as jazidas naturais.



## 1. REFERÊNCIAS

1. DOS SANTOS, Reginaldo Dias. **Estudo térmico e de materiais de um compósito a base de gesso e EPS para construção de casas populares**. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2001.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
5. FONTOURA, Ana Carolina R.; OLIVEIRA, Felipe F.; SILVA, Paula L. B.; FLEMING, Robson; CALIXTO, Thuani Fontoura. **Estudo da viabilidade da utilização de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em argamassas**. Disponível em: <<http://revistaea.org/artigo.php?idartigo=2762>>. Acesso em 17 de janeiro de 2019.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR 13277**: Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR 13278**: Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR 13276**: Preparo mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR 13279**: Determinação da resistência à flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ABNT NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.



## UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO NO CONCRETO: LACUNAS NO CONHECIMENTO.

**Kuelson Rândello Dantas Maciel** <sup>(1)</sup>; **Mariana da Penha Novaes** <sup>(2)</sup>; **Elilma Pereira Alves Teodoro** <sup>(3)</sup> **João Luiz Calmon** <sup>(3)</sup>

(1) Universidade Federal da Bahia – kuelson@gmail.com; (2) Universidade Federal da Bahia – mariana.penha.novaes@hotmail.com; (3) Universidade Federal da Bahia – elilma\_civil@hotmail.com; (4) Universidade Federal da Bahia - calmonbarcelona@gmail.com

### RESUMO

Existe um constante aumento da preocupação das questões ambientais, sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores mundiais de rochas ornamentais, no entanto, o processo de tratamento desses materiais gera uma grande quantidade de resíduo que na maioria dos casos não possui uma destinação adequada. Buscando solucionar esse problema, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas para o reaproveitamento desses resíduos, especificamente na construção civil e utilizá-los em substituição ou adição de materiais convencionais no concreto. O presente trabalho busca desenvolver uma revisão dos estudos realizados na utilização do mármore e granito no concreto e identificando as lacunas do conhecimento. Tal revisão consistirá das seguintes etapas: quantificação do resíduo no Brasil e no mundo, beneficiamento do resíduo de mármore e granito para serem incorporados no concreto, análise bibliométrica no *Scopus*, e *Web of Science*, estudo estatístico e identificar as lacunas em relação as propriedades mecânicas com a incorporação do resíduo de mármore e granito. A revisão da literatura sugere que o resíduo de mármore e granito pode ser um substituto no cimento e no agregado miúdo como materiais de construção convencionais com resultado eficientes e identificou que existe lacunas de estudos no conhecimento das propriedades reológicas, térmicas, microestrutura, ataques de sulfatos e do meio agressivo.

**Palavras chaves:** Mármore, granito, resíduos, bibliometria e lacunas

## USE WASTE OF MARBLE AND GRANITE IN CONCRETE: KNOWLEDGE GAPS.

### ABSTRACT

There is a constant increase of concern about environmental issues, Brazil being one of the world's largest producers and exporters of ornamental stones, however, the treatment process of these materials generates a large amount of waste that in most cases does not have an adequate destination. In order to solve this problem, several researches are being developed to reuse these wastes, specifically in civil construction and to use them in substitution or addition of conventional materials in the concrete. The present work seeks to develop a review of the studies carried out on the use of marble and granite in concrete and identifying the knowledge gaps. Such a review will consist of the following steps: quantification of the waste in Brazil and in the world, processing of the marble and granite residue to be incorporated in the concrete, bibliometric analysis in the *Scopus*, statistical study, and *Web of Science* and identify the gaps in relation to the mechanical properties with the incorporation of the residue of marble and granite. The literature review is that the composite of marble and granite can be replaced by a cement and not aggregated as a building material with the power to generate identification errors. and the aggressive medium.

**Key-words:** Marble, granite, waste, bibliometrics and gaps.



## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, o crescimento da produção industrial e o consequente aumento do consumo correspondente levaram a um rápido declínio dos recursos naturais disponíveis<sup>(1)</sup>. Além disso, com o aumento da produção uma quantidade significativa de resíduos surge, e estes impactam negativamente o meio ambiente. Segundo<sup>(2)</sup> a quantidade gerada de resíduo corresponde a mais de 25% do volume dos blocos processados e, considerando que, em 2017, foram processados 152 milhões de toneladas de rochas ornamentais no mundo com uma produção de resíduos finos próxima a 40 milhões de toneladas para o ano de 2018. No Brasil, foram processadas mais de 7 milhões de toneladas de rochas e gerados mais de 2 milhões de resíduos finos em 2017, sendo o estado do Espírito Santo responsável por 50% da produção nacional, por 75% do volume físico e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras de rochas<sup>(3)</sup>.

Várias organizações internacionais e países focaram em examinar a reciclagem de resíduos para minimizar os efeitos negativos. Ao usar esses subprodutos que não podem ser armazenados em outros setores, o ganho econômico pode ser alcançado e a poluição ambiental pode ser evitada<sup>(4)</sup>.

O aproveitamento do resíduo de mármore e granito na indústria da construção civil tem sido muito estudado no âmbito acadêmico, uma vez já comprovada a viabilidade técnica de seu uso na obtenção de diversos produtos como cerâmica<sup>(5),(6)</sup>, porcelanas e vidros <sup>(7),(8)</sup>, lâ mineral<sup>(9)</sup>, concretos em substituição do cimento<sup>(13), (10),(17), (11),(12)</sup>, ou como agregado miúdo <sup>(16), (14),(15)</sup>.

Com tudo que foi relatado o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão dos estudos sobre a utilização do mármore e granito no concreto e identificar as possíveis lacunas do conhecimento. E a pretexto, demonstrar que o uso do resíduo de mármore e granito na produção de concreto é eficaz no combate à poluição ambiental e na melhoria das propriedades do material.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Método ProKnow-C**

A metodologia sistemática aplicada foi o método ProKnow-C - Processo de Desenvolvimento do Conhecimento e Construtivista<sup>(18)</sup>, que consiste em quatro etapas principais: (1) seleção dos documentos que serão analisados; (2) análise bibliométrica; (3) análise sistemática e (4) Identificação de lacunas de literatura.



Essa seleção de portfólio bibliográfico iniciou-se com a busca nas bases de dados do Portal Capes (CAPES, 2019) que possuíam maior relação com o tema - *Scopus* e *Web of Science* - definidas a partir de um estudo prévio sobre o assunto. A primeira pesquisa foi realizada com o uso das duas palavras chaves: *granite* e *marble*. Essa busca gerou um banco de artigos, teses e dissertações bruto de 6440 referências. Foram aplicadas nestas referências cinco filtros conforme observa-se na Figura 1 chegando ao total de 57 títulos, no qual existem 20 dissertações e teses e 37 artigos.

Figura 1 - Metodologia utilizada para a seleção dos artigos.

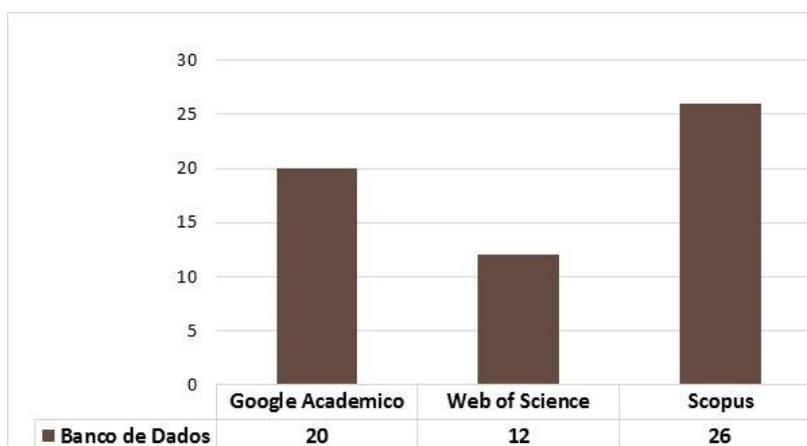


Fonte: Os Autores (2019).

### 3. ESTUDO DE BIBLIOMETRIA

Os resultados do mapeamento bibliométrico foram classificados com relação a diversos aspectos, a fim de se obter um melhor entendimento sobre o perfil das publicações mais recentes sobre o assunto. O gráfico 1 ilustra as publicações por base de dados pesquisadas após aplicação dos filtros, conforme figura 1. Observou-se que a base de dados *Scopus* e *Web of Science* possuem maior relevância como fonte de pesquisa para artigos (37), assim como o Google Acadêmico para busca de artigos, dissertações e teses (20).

Gráfico 1 Publicações analisadas por base de dados sobre o uso do resíduo de mármore e granito no concreto.

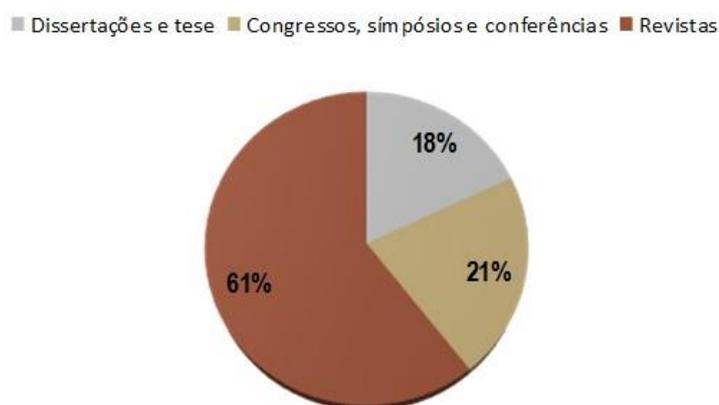


Fonte: Os Autores (2019).



De acordo com o gráfico 2, que classifica os tipos de publicações vinculados ao tema sobre o uso do resíduo de mármore e granito no concreto, percebe-se que das 58 publicações levantadas, 61% das referências estudadas são provindas de revistas, 21% de congresso, simpósios e conferências e 18% de dissertações e teses nesse artigo. Observa-se que as publicações em revistas deram a maior contribuição para o estudo.

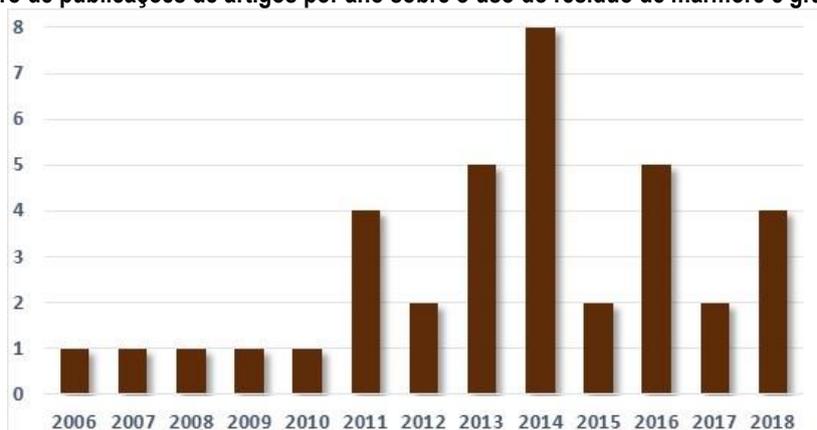
**Gráfico 2** Tipos de publicações com o uso do resíduo de Mármore e granito no concreto.



Fonte: Os Autores (2019).

O gráfico 3 apresenta as publicações de artigos vinculados ao tema por ano, no período de 2006 a 2018. Observa-se um crescimento de publicações a partir do ano de 2014 com maiores picos entre os anos de 2016 e 2018 sobre o uso do resíduo de mármore e granito no concreto.

**Gráfico 3** Número de publicações de artigos por ano sobre o uso do resíduo de mármore e granito no concreto.

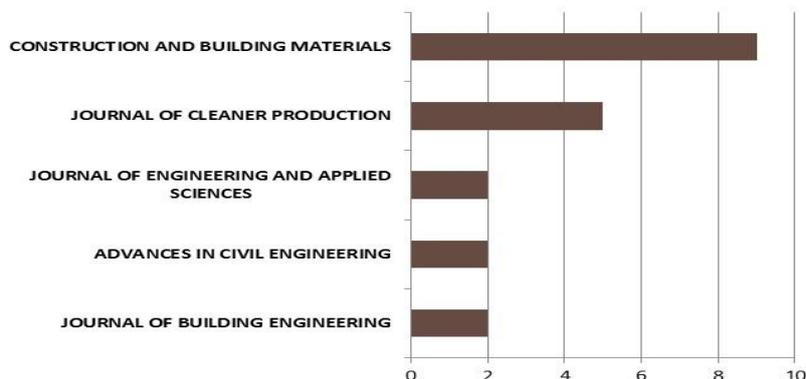


Fonte: Os Autores (2019).

Os periódicos com maior número de produções científicas estão apresentados no gráfico 4. Destacam-se principalmente Construction and Building Materials e Journal of Cleaner Production, periódicos especializados na divulgação de pesquisas e no desenvolvimento da área de materiais de construção e suas aplicações. Não foram incluídas no gráfico 4 as 17 revistas com uma publicação sobre o tema.



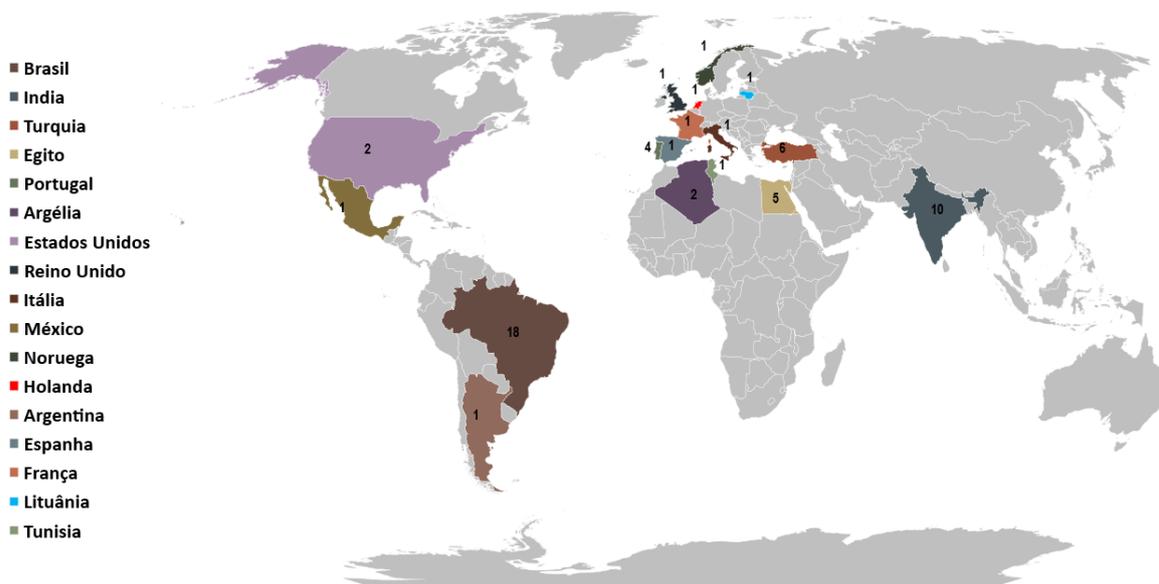
Gráfico 4 Revistas com o número de artigos publicados sobre o tema.



Fonte: Os Autores (2019).

O gráfico 5 mostra a distribuição da produção científica no mundo, em publicações de artigos, teses e dissertações, do uso do mármore e granito no concreto. Dentre os selecionados para revisão o Brasil compartilhou o maior número de estudos (18), seguido pela Índia (10), Turquia (6), Egito (5), Portugal (4). A Argélia e Estados Unidos contribuíram com dois estudos e , Reino Unido, Itália e México, Noruega, Holanda, Argentina, Espanha, França, Lituânia e Tunísia com um estudo no período de 2006 a 2018.

Gráfico 5 Distribuição geográfica de estudos da utilização de mármore e granito com aplicação no concreto.

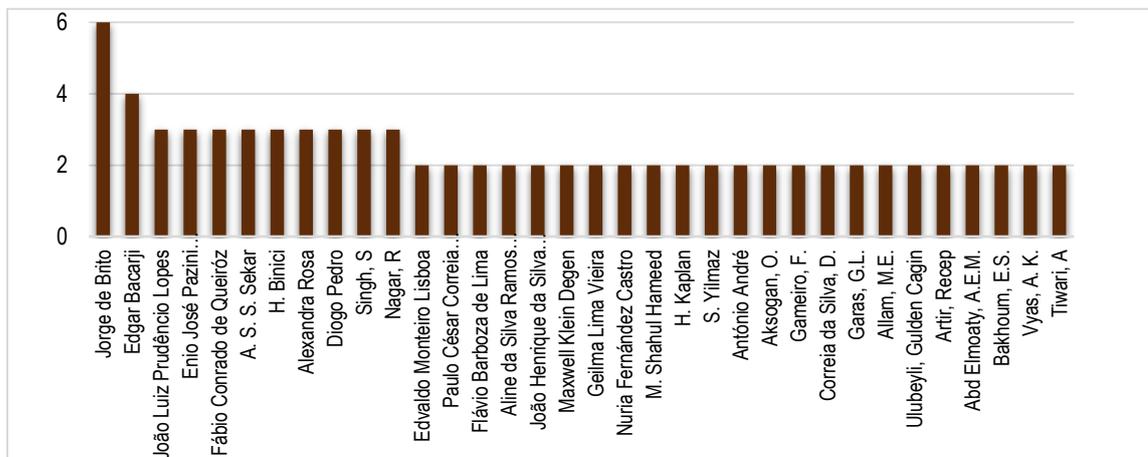


Fonte: Os Autores (2019).

O nome dos autores com maior número de produções relativas ao uso do resíduo de mármore e granito aplicado no concreto encontra-se no gráfico 6, com destaque para o pesquisador português Jorge de Brito. Dentre os dez maiores pesquisadores, observa-se seis pesquisadores são brasileiros.



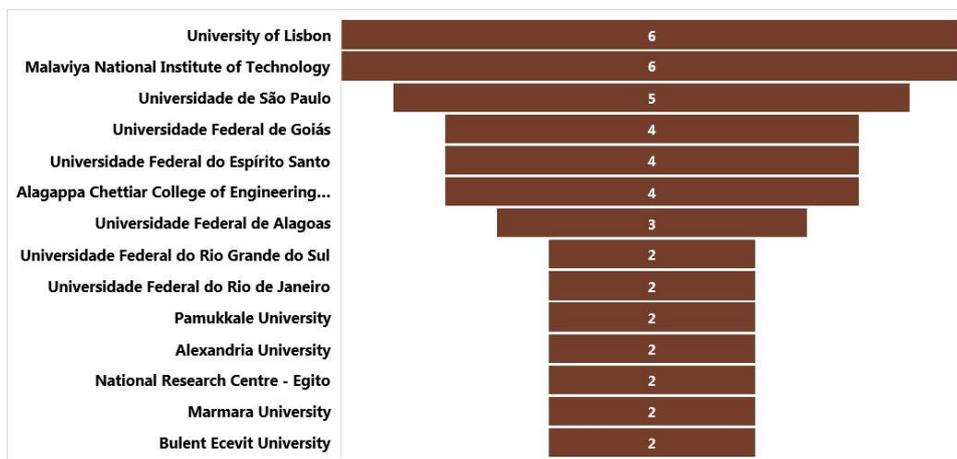
**Gráfico 6 Publicações de artigos por autores sobre a utilização de mármore e granito no concreto.**



Fonte: Os Autores (2019).

O gráfico 7 evidencia as instituições de origem com maior número de publicações em relação ao tema. A *University of Lisbon*, *Malaviya National Institute of Technology* e Universidade de São Paulo apresentam maior contribuição, o que indica grande empenho no estudo do resíduo com foco na busca por alternativas de reuso.

**Gráfico 7 Instituição de origem e o número de publicações de artigos sobre o uso do resíduo no concreto.**



Fonte: Os Autores (2019)

#### **4. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM O USO DO RESÍDUO DE MÁRMORE E GRANITO.**

As análises feitas para esse estudo concentraram-se em realizar uma revisão do uso do resíduo de mármore e granito no concreto convencional e auto adensável. De acordo com a tabela 1 a maioria



dos pesquisadores trabalharam com o concreto convencional, utilizando o resíduo de mármore e granito em substituição ou adição em materiais convencionais como cimento e agregado.

**Tabela 1 – Pesquisa sobre a utilização de mármore e granito em diferentes tipos de concreto.**

<b>Concreto auto adensável</b>		<b>Concretos convencionais</b>	
Uysal, M e Yilmaz, K (2011)	Gonçalves et. al. (2002)	Abd Elmoaty (2013)	Allam et. al. (2016)
Geseoglu et. al. (2012)	Lopes et. al (2006)	Soliman (2013)	Singh et. al(2016)
Hameed et. al (2012)	Binici et. al (2007)	André et. al (2014)	Kore e Vyas (2016)
Karmegam, Kalidass e Ulaganathan (2014)	Gomes e Bacarji (2008)	Aliabdo et. al (2014)	Belagraa et. al. (2017)
Ural, Karakurt e Cömert (2014)	Binici et. al (2008)	Martins et. al (2014)	Vigneshpandian et. al. (2017)
Sadek et. al. (2016)	Ergun (2011)	Silva, Gameiro e Brito (2014)	Binici et. al (2018)
Djebri et. al. (2017)	Hebhoub et.al(2011)	Talah; Kharchi Chaid (2015)	Shamsabadi et. al (2018)
	Hameed et. al (2012)	Elçi et. al. (2015)	Sivakumar et. al. (2018)
	Bacarji et.al(2013)	Singh et. al (2016)	
	Vijayalakshmi et. al. (2013)	Sattainathan S. et. al. (2016)	

**Fonte:** Os Autores (2019).

Os artigos acima foram classificados de acordo com a incorporação do resíduo na fabricação do concreto e organizados na tabela 2. Na literatura, 35% e 32% dos estudos se concentraram no uso do resíduo como substituto do cimento e substituto do agregado miúdo, respectivamente. A adição ao cimento, possui 11% do número de estudos, o que representa o menor resultado.

**Tabela 2 – Estudos revisados baseado nos tipos de incorporação dos resíduos de mármore e granito.**

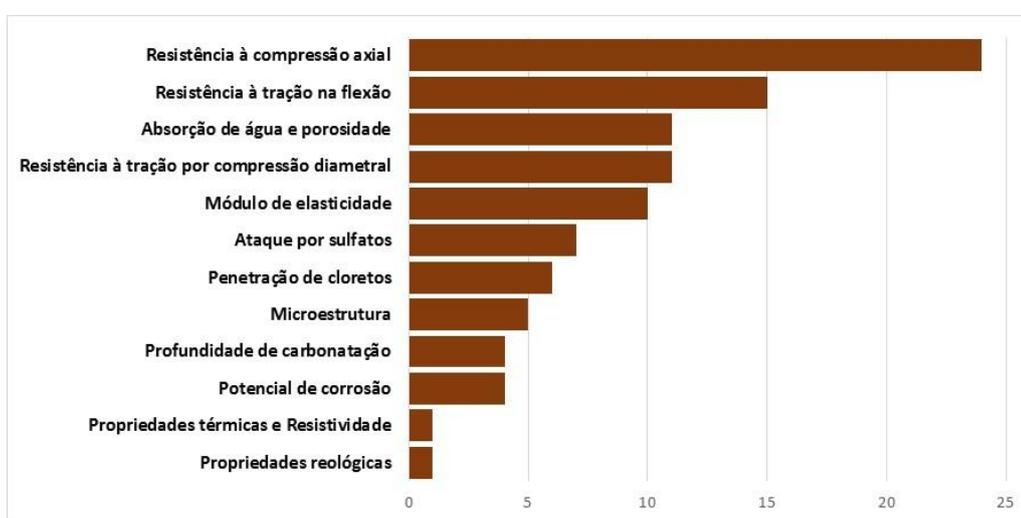
<b>Estudos sobre a substituição do cimento por resíduo de mármore/granito no concreto</b>	<b>Estudos sobre a adição ao cimento por resíduo de mármore/granito no concreto</b>	<b>Estudos sobre a substituição do agregado graúdo pelo resíduo de mármore/granito no concreto</b>	<b>Estudos sobre a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de mármore/granito no concreto</b>
Lopes et. al 2006)	Ural, Karakurt e Cömert (2014)	Binici et. al (2008)	Binici et. al (2007)
Uysal, M e Yilmaz, K (2011)	Sadek et. al. (2016)	Hebhoub et.al. (2011)	Gomes e Bacarji (2008)
Ergun (2011)	Belagraa et. al. (2017)	André et. al (2014)	Hebhoub et.al (2011)
Geseoglu et. al. (2012)	Alyousef et. al. (2018)	Martins et. al. (2014)	Hameed et. al (2012)
Abd Elmoaty (2013)		Elçi et. al. (2015)	Vijayalakshmi, Sekar e Prabhu (2013)
Soliman (2013)		Kore e Vyas (2016)	Aliabdo et. al (2014)
Bacarji et.al (2013)		Ulubeyli; Bilir; Artir (2016)	Silva, Gameiro e Brito (2014)
Karmegam, Kalidass e Ulaganathan (2014)		Sattainathan S. et. al. (2016)	Garas; Allam; Bakhoum (2014)
Aliabdo et. al (2014)			Elçi et. al. (2015)
Talah; Kharchi Chaid (2015)			Allam et. al. (2016)
Allam et. al. (2016)			Singh et.al(2016)
Djebri et. al. (2017)			Vigneshpandian et. al. (2017)
Serelis et. al. (2018)			Binici et. al (2018)
Shamsabadi et. al (2018)			

**Fonte:** Os Autores (2019)



As principais propriedades estudadas do concreto no estado fresco e endurecido foram listadas no Gráfico 8 assim como a quantidade de artigos que analisou determinado parâmetro. A trabalhabilidade do material foi analisada em todos os trabalhos com ensaios padronizados. A durabilidade foi analisada de diferentes maneiras, com destaque para a relação indireta com a resistência à compressão axial, absorção de água, ataque por sulfatos, penetração de cloretos e profundidade de carbonatação. Apenas um autor analisou as propriedades térmicas e propriedades reológicas do material com a incorporação do resíduo de mármore e granito.

**Gráfico 8** Quantidade de trabalhos de acordo com as propriedades estudada no concreto.



Fonte: Os Autores (2019)

#### 4.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial, com a adição de resíduo de corte de granito, e concluíram que os concretos com 10% de adição de resíduo de corte de granito obtiveram um ganho médio de 8%, enquanto para os concretos com adição de 20% houve um aumento de 19,6% em relação ao concreto de referência<sup>(19)</sup>.

Misturas de concretos foram produzidas com substituição de 5%, 10% e 20% do resíduo de beneficiamento de mármore e granito no cimento. Os resultados mostraram que a resistência à compressão do concreto diminuiu com os teores de substituição em 10% e 20%, porém com 5% de substituição não houve variações significativas<sup>(20)</sup>.

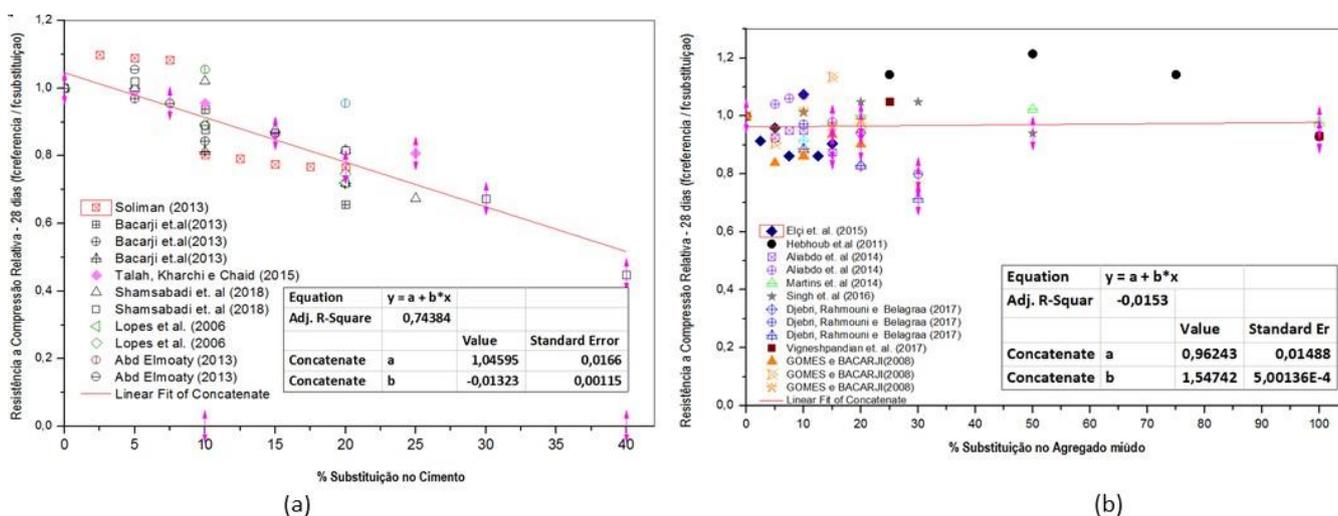
Segundo<sup>(22)</sup> obtiveram resultados para resistência a compressão em relação a substituição do agregado miúdo por resíduo de mármore, e concluiu que houve diminuição, em todas as idades de cura, quando comparada ao concreto de referência.



Os gráficos 9 e 10 para cada um dos ensaios selecionados, originou-se uma curva de dispersão no software origin, no qual cada ponto representou um valor encontrado por determinado(s) autor(es), sendo a coordenada abscissa correspondente a porcentagem de resíduo utilizado no concreto, já a coordenada ordenada representa o valor relativo da propriedade estudada, isto é, os valores encontrados com a substituição, por cada autor em relação aos valores dos corpos de prova de referência ou controle de cada autor. Esses gráficos serviram como base para as discussões presentes nos resultados.

No Gráficos 9(a) percebe-se que o uso do resíduo de mármore e granito no concreto convencional em substituição do cimento em relação a resistência à compressão é comparado com base em diferentes estudos. Os resultados sugeriram que a relação da resistência de referência com 0% de substituição no cimento( $f_{cr}/f_{cs}$ ) até o percentual de 10% não ocorreu variação, a partir de 10% e 20% de substituição percebesse um decrescimento em torno de 10% a 20% da relação  $f_{cr}/f_{cs}$ , respectivamente. Percebeu-se ainda que a maioria dos pesquisadores realizou um estudo até um teor de 20% de substituição no cimento. Em relação a substituição no agregado miúdo (Gráfico 9(b)) percebeu-se que até o percentual de 10% não ocorreu grandes variações, a partir de 20% a 30% de substituição percebesse um decrescimento em torno de 20% da relação  $f_{cr}/f_{cs}$ .

**Gráfico 9 Relação da resistência a compressão axial relativa do concreto convencional com o uso do resíduo mármore e granito no concreto.**

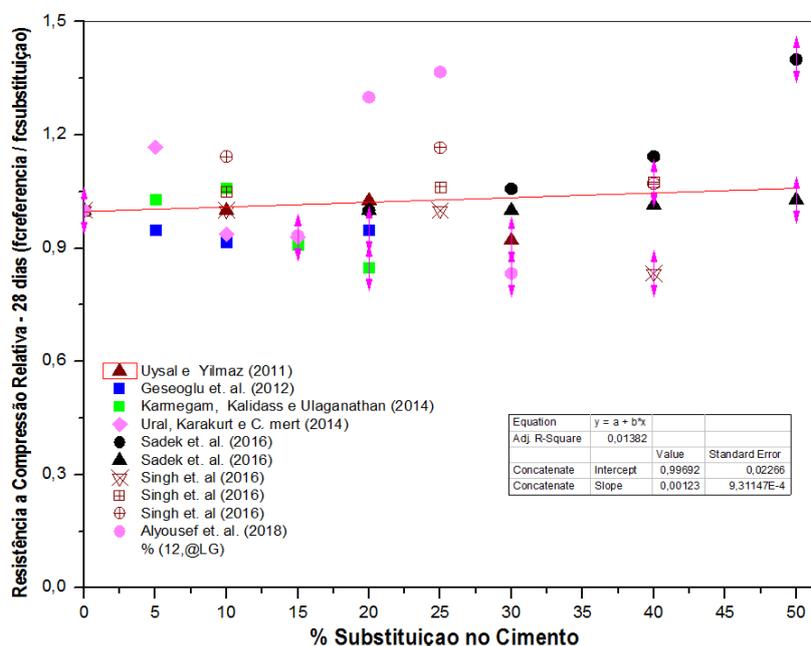


Em relação a análise de regressão realizada conforme Gráfico 8, percebeu-se que na substituição do resíduo no cimento o  $R^2 = 0,74384$  (correlação boa) e mostrando que até 10% de substituição do resíduo com o cimento é significativo, enquanto que na substituição do resíduo pelo agregado miúdo obteve-se uma péssima correlação, no qual tem uma tendência a existir divergências entre as pesquisas analisadas.



Em relação a concreto auto adensável só foi avaliado quando o resíduo foi substituindo no cimento. Percebe-se no Gráfico 10 que os principais estudos observaram um ganho na resistência a compressão quando substituído até 50%. Em alguns estudos (embora poucos), o valor foi observado que em 10% ocorreu um decréscimo da resistência a compressão em relação a de referência, observando que não existe um consenso nas pesquisas estudadas, por ter valores relativos superiores e inferiores a referência relativa.

Gráfico 10 Relação da resistência a compressão axial relativa no concreto auto adensável com o uso do resíduo mármore e granito em substituição ao cimento.



Fonte: Os Autores (2019)

#### 4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os concretos com 10% de adição de resíduo de granito apresentaram melhor comportamento da resistência à tração por compressão diametral, em relação ao concreto de referência. No concreto com 20% de adição, houve uma redução<sup>(19)</sup>.

A resistência a tração por compressão diametral com os teores de 5% e 10% não houve variação significativa<sup>(21)</sup>.

Os pesquisadores <sup>(24)</sup> descreveram que para a resistência à tração por compressão diametral, os traços mais pobres, com relação 1:6,5, apresentaram maior resistência com a adição de resíduos.

Segundo os pesquisadores <sup>(22)</sup> o resíduo de mármore, com teor de substituição de 10%, promoveu melhorias na resistência à tração por compressão diametral do concreto.



#### 4.3 Resistência à tração na flexão

Conforme <sup>(19)</sup> os concretos com adição de 10% e 20% de resíduo de granito apresentaram um comportamento semelhante na resistência à tração na flexão em relação ao concreto de referência.

Segundo os pesquisadores <sup>(25)</sup> os resultados obtidos melhoraram a resistência a tração na flexão com a utilização do mármore triturado, especialmente para a granulometria ótima.

Os pesquisadores <sup>(15)</sup> investigaram o uso combinado de mármore, granito e escória de alto forno é um substituto adequado para o agregado convencional. Os valores de resistência à tração na flexão para todos os concretos com resíduo foram superiores comparado-se com o concreto convencional.

#### 4.4 Modulo de elasticidade

De acordo com os resultados o maior módulo elástico estático foi obtido com a adição de 20% em substituição ao cimento e o maior módulo elástico dinâmico foi obtido com a adição de 10%. Em geral, o aumento das taxas de substituição de aditivos minerais diminuiu os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos <sup>(26)</sup>.

Conforme estudos realizados <sup>(26)</sup> foi observado que os concretos com rejeito de mármore triturado apresentam maior módulo de elasticidade e coeficiente de poisson que os concretos com agregado miúdo.

#### 4.5 Propriedades Reológicas

A influência do pó de mármore nas propriedades reológicas de pastas de cimento para prever o efeito de sua adição em misturas de concreto auto adensáveis foi investigado e devido à sua finura bastante elevada, a adição de pó de mármore é eficaz em assegurar uma coesão muito boa em argamassa e concreto, desde que a a/c seja o inferior a 0,5 <sup>(27)</sup>.

#### 4.6 Parâmetros de Durabilidade

A influência foi avaliada na substituição de agregados graúdos convencionais por agregados graúdos de mármore nas proporções de 20%, 50% e 100%. Em termos de durabilidade, foi demonstrado que o agregado graúdo de mármore produz concretos com características semelhantes às aquelas feitas com agregados graúdos de basalto, calcário e granito <sup>(28)</sup>.

Os efeitos do resíduo de mármore<sup>(1)</sup> em algumas propriedades de durabilidade avaliaram, como absorção de água e permeabilidade, penetração de cloretos, carbonatação, ataque por sulfatos, resistência à abrasão, e por último desempenho em alta temperatura e ciclos de congelamento e



descongelamento do concreto convencional ou auto adensável. Constatou que o uso do resíduo de mármore no concreto convencional ou auto adensável como aditivos minerais ou agregado miúdo/gráuado afetaram positivamente as propriedades de durabilidade do concreto.

#### 4.7 Penetração de Cloretos

Segundo os pesquisadores <sup>(19)</sup> concluíram que devido a presença do resíduo de corte de granito, criou-se uma barreira física e assim houve maior dificuldade na penetração dos íons cloretos na matriz.

A influência do pó de mármore foi estudado como substituto parcial do cimento Portland. Notou-se que a adição conferiu uma grande potência de nucleação e contribuiu efetivamente para a redução da penetração do íons cloreto e permeabilidade ao oxigênio<sup>(30)</sup>.

#### 4.8 Potencial de corrosão

Uma investigação experimental sobre a resistência à corrosão do concreto modificado com pó de granito com o uso de 5,0% de pó de granito aumentou o tempo de corrosão e não se observou redução significativa no tempo de fissuração no conteúdo com pó de granito superior a 5,0%<sup>(31)</sup>.

#### 4.9 Resistividade do concreto

A resistividade elétrica volumétrica e superficial dos concretos foram analisadas e para ambas comprovaram que tanto a adição da lama de marmoraria no concreto quanto a substituição do cimento pelo pó da lama não aumentaram as resistividades elétrica, sendo que para a volumétrica a dosagem com substituição de 20% e apresentou menor valor de resistividade elétrica se comparado a dosagem de referência. <sup>(23)</sup>

#### 4.10 Profundidade de carbonatação

Segundo estudos que avaliaram a adição de resíduo de corte de mármore e granito ao concreto auto adensável a propagação da carbonatação apresentou um desempenho 6 % melhor que a do concreto de referência e 18% melhor que concreto com aditivo inibidor de corrosão composto<sup>(32)</sup>.

De acordo com estudos que produziram concretos com agregados obtidos a partir de resíduos de mármore. O resultado de carbonatação no concreto contendo agregado de mármore mostrou quase a mesma tendência do concreto convencional<sup>(33)</sup>.

#### 4.11 Microestrutura



De acordo com estudos que investigaram a aplicabilidade do resíduo de mármore e granito como alternativa sustentável para substituição do cimento<sup>(34)</sup>. A análise de difração de raios-X mostrou uma natureza cristalina e uma reatividade não-pozolânica para o resíduo de mármore e granito.

Estudos realizados em amostras de pasta de cimento com 0%, 7,5% e 15,0% de pó de granito como substituto do cimento<sup>(31)</sup>. Mostraram a alta porcentagem de quartzo em pastas de cimento modificadas com pó de granito e na análise do MEV mostraram que não há alterações significativas entre as pastas de cimento com e sem pó de granito.

Os efeitos do volume da pasta cimento com pó de mármore sobre a reologia no estado fresco e as propriedades endurecidas (resistência à compressão) do concreto autoadensável por meio de uma análise microestrutural em amostras de pastas com diferentes quantidades de pó de mármore foram estudado<sup>(36)</sup> em ensaios microscópio eletrônico de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX) na pasta.

## 5. CONCLUSÕES

Constatou-se em todos os textos a importância do tema ao relatar o grave problema da geração de resíduos no setor de rochas ornamentais em vários países assim como o grande potencial do setor industrial da construção civil em incluir esse resíduo nos seus processos produtivos.

A utilização do resíduo de mármore e granito como material de construção em substituição ao cimento e aos agregados tem sido extensivamente estudados nos últimos anos para ser utilizado no concreto. A revisão da literatura sugere que o resíduo de mármore e granito pode ser um substituto eficaz em materiais de construção convencionais em substituição ao cimento com resultados satisfatórios até o teor de incorporação de 20% e em substituição ao agregado miúdo de 10% .

Existem lacunas do conhecimento em algumas propriedades do concreto com o uso do resíduo de mármore e granito, no qual precisam ser analisadas como as propriedades reológicas, térmicas e análises de microestrutura. Os parâmetros de durabilidade mais analisados são porosidade e absorção de água. As análises feitas sobre ataques por sulfatos, penetração de íons cloretos e carbonatação necessitam de aprofundamento através de ensaios menos agressivos (reduzindo-se a concentração da solução e ampliando-se o tempo de observação). Os ensaios de permeabilidade ao oxigênio, desempenho em altas temperaturas e ciclos de congelamento e descongelamento foram pouco estudados.



Em relação aos trabalhos estudados, a utilização do resíduo de mármore e granito proporcionou ao concreto uma resistência a compressão axial adequada quando substituído em teores de até 20% no cimento com uma boa correlação entre os dados estudados para um teor de 10% e até 10% em relação aos agregados miúdos, porém sem uma boa correlação entre os dados pesquisados, existindo assim uma lacuna para ser estudada.

Dentre os parâmetros mecânicos estudados o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson precisam ser mais pesquisados. Um estudo da avaliação de ciclo de vida necessita ser realizados em diferentes cenários geográficos e de aplicação.

A interação da utilização do resíduo de mármore e granito com outras adições foram menos exploradas, destacando-se para as adições cinza volante, pedra calcária e escória de alto forno.

## 6. REFERÊNCIAS

1. ULUBEYLI, G. C.; BILIR, T.; ARTIR, R. **Durability properties of concrete produced by marble waste as aggregate or mineral additives**. *Procedia engineering*, v. 161, p. 543-548, 2016.
2. SOUZA, D. V. D., VIDAL, F. W. H., e CASTRO, N. F.. **Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais**. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Anais. Rio de Janeiro: CETEM, 2012
3. MONTANI, CARLO. **XXIX Rapporto marmo e pietre nel mondo 2018**. Carrara (Itália): Aldus Casa di Edizione, In Carrara, 2018. 326 p. 2 v.
4. DEMIREL, B e ALYAMAÇ, K, E. **Waste marble powder/dust**. In: *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. 2018. p. 181-197.
5. Babisk, M. P., Vidal, F. W. H., Ribeiro, W. S., Aguiar, M. C., Gadioli, M. C. B., & Vieira, C. M. F.. **Incorporação de resíduo de quartzitos em cerâmica vermelha**. *HOLOS*, 6. (2012).
6. GIORI, A.J.N. **Influência da variabilidade composicional dos resíduos de rochas ornamentais em propriedades físicas e microestruturais de cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.
7. TORRES, P., FERNANDES, H. R., AGATHOPOULOS, S., TULYAGANOV, D. U. e FERREIRA, J. M. F. **Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations**. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, n. 10-11, p. 3177-3185, 2004.
8. BABISK, M. P.. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais**. *Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, RJ*, v. 90, 2009.
9. ALVES, J.O. **Processo de reciclagem de escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lâ mineral**. 2008. 100 f. il. Dissertação (Mestrado) – REDEMAT. Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais (Brasil).
10. ALLAM, M. E., BAKHOUM, E. S., EZZ, H., e GARAS, G. L. **Influence of using granite waste on the mechanical properties of green concrete**. *ARN J EngApplSci*, v. 11, n. 5, p. 2805-2811, 2016.



11. DJEBRI, N; RAHMOUNI, Z. E., BELAGRAA, L. **Experimental Investigation on the Effect of Marble powder on the performance of Self-Compacting Concrete (SCC).** Mining Science, v. 24, 2017.
12. ASADI SHAMSABADI, E., GHALEHNOVI, M., DE BRITO, J. e KHODABAKHSHIAN, A. **Performance of Concrete with Waste Granite Powder: The Effect of Superplasticizers.** Applied Sciences, v. 8, n. 10, p. 1808, 2018..
13. ALIABDO, A. A., ELMOATY, A. E. M. A. e AUDA, E. M. **Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete.** Construction and building materials, v. 50, p. 28-41, 2014.
14. VIGNESH PANDIAN, G. V. et al. **Utilisation of Waste Marble Dust as Fine Aggregate in Concrete.** In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.** IOP Publishing, 2017. p. 012007
15. BINICI, Hanifi; AKSOGAN, Orhan. **Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate.** Journal of Building Engineering, v. 19, p. 109-121, 2018.
16. ELÇI, H., TÜRK, N. e İŞINTEK, İ. **Limestone dimension stone quarry waste properties for concrete in Western Turkey.** Arabian Journal of Geosciences, v. 8, n. 10, p. 8951-8961, 2015.
17. AREL, H. Ş. **Recyclability of waste marble in concrete production.** Journal of Cleaner Production, v. 131, p. 179-188, 2016.
18. ENSSLIN, L., GIFFHORN, E., ENSSLIN, S. R., PETRI, S. M., e VIANNA, W. B.. **Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão-construtivista.** Pesquisa Operacional, v. 30, n. 1, p. 125-152, 2010.
19. GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, C. D. **Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto.** Revista Ambiente Construído. v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.
20. LOPES, J.L.M.P.; BACARJI, E.; FIGUEIREDO, E.P.; RÊGO, J.H.S. **Influence of the Marble and Granite Benefication of Residue (MGBR) as filler on the properties of concrete.** American Concrete Institute. 2008.
21. DEGEN, M. K; VIEIRA, G. L.; CALMON, J. L.; ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S. **Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento.** Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto). IBRACON. 2013.
22. MATIAS, M. A. P.; BEZERRA, L. E. F.; MENDONÇA, A. M. G. D. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com agregado reciclado.** III CONAPESC. Campina Grande, 2018.
23. ARAÚJO, F. M.; COSTA, J. M.; CHAHUD, E.; JUNIOR, D.P. **Estudo da resistividade elétrica em concretos com resíduo de lama de marmoraria.** Revista Construindo, 2018. v. 10. P 30 - 45.
24. PETRY, N. S.; DELONGUI, L.; MULLER, A. L.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. **Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos.** Revista de Arquitetura IMED, 2017.
25. COURA, C. V. G.; **Análise experimental sobre a substituição do agregado miúdo por mármore triturado na confecção de concreto.** Tese. (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal Fluminense, 2009.



26. UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Kemalettin. **Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 7, p. 771-776, 2011.
27. CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T.R. **Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete.** Construction and Building Materials, 2010.
28. ANDRÉ, A.; BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. **Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste.** Journal of Cleaner Production, 2014.
29. VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. S. S.; PRABHU, G. G. **Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste.** Construction and Building Materials, 2013.
30. TALAH, A.; KHARCHI, F.; CHAID, R. **Influence of Marble Powder on High Performance Concrete Behavior.** 1st International Conference on Structural Integrity (ICSI), 2015.
31. ABD ELMOATY, A.E.M. **Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust.** Construction and Building Materials, 2013.
32. BARROS, P. G. S.; **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2008.
33. KORE, Sudarshan D.; VYAS, A. K. **Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete.** Case Studies in Construction Materials, v. 4, p. 85-92, 2016.
34. BACARJI, E; TOLEDO, R.D.; KOENDERS, E.A.B.; FIGUEIREDO, E.P.; LOPES, J.L.M.P. **Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers.** Construction and Building Materials, 2013.
35. KARMEGAM, A.; KALIDASS, A.; ULAGANATHAN, D. **Utilization of granite sawing waste in self compacting concrete.** Materials Research-Ibero-American Journal of Materials, 2014.
36. ALYOUSEF, R.; BENJEDDOU, O.; KHADIMALLAH, M. A.; MOHAMED, A. M., & SOUSSI, C. (2018). **Study of the Effects of Marble Powder Amount on the Self-Compacting Concretes Properties by Microstructure Analysis on Cement-Marble Powder Pastes.** Advances in Civil Engineering, 2018.



## UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO NO CONCRETO: LACUNAS NO CONHECIMENTO

**Victor Antunes Silva Barbosa** <sup>(1)</sup>; **Lucas Lima Costa** <sup>(2)</sup>; **Matheus Gomes Martins**<sup>(3)</sup>;  
**João Luiz Calmon**<sup>(4)</sup>

(1) Universidade Federal da Bahia – victor\_antunes07@hotmail.com; (2) Universidade Federal da Bahia – lucascst@gmail.com; (3) Universidade Federal da Bahia – matheusgm@ufba.br; (4) Universidade Federal da Bahia – calmonbarcelona@gmail.com

### RESUMO

Os resíduos urbanos, produtos da interação humana, têm se mostrado uma problemática devido descarte inadequado destes materiais, causando um dano ambiental através do acúmulo em aterros sanitários ou locais de deposição inadequados. Pesquisas têm demonstrado o potencial de emprego dos resíduos na construção civil. Este potencial traz menos impactos ao meio ambiente pois, utiliza-se o processo de destinação adequada a um material previamente utilizado, tornando-o apto ao reemprego associado a novas soluções. Neste contexto, enquadram-se os resíduos de vidro, material abundante nos centros urbanos, encontrado em garrafas, lâmpadas janelas, copos e pratos, e que são descartados após a quebra. No meio ambiente, o vidro demanda 4 mil anos para inteira decomposição, o que demonstra a necessidade de estudos visando o seu aproveitamento. O presente trabalho revisou as pesquisas que utilizam resíduo de vidro no concreto. Para isto, foram realizados: quantificação do resíduo no Brasil e no mundo; estudo do beneficiamento do resíduo; estudo de sua utilização no concreto; realizou-se pesquisa bibliométrica em bancos de dados científicos (*Scopus, Web of Science, Engineering Village e Science Direct*); levantou-se os ensaios realizados para identificar as propriedades e parâmetros de durabilidade do concreto que incorporam o resíduo; e foram tratados estatisticamente, quando possível, os resultados encontrados pelos autores. Os resultados obtidos apontam para as lacunas no tema proposto e fomentam a continuidade das pesquisas na área.

**Palavras-chave:** vidro, resíduo, concreto, lacuna.

## EMPLOYMENT OF GLASS RESIDUE IN CONCRETE: KNOWLENCE GAPS

### ABSTRACT

Urban waste, problems of human nature, problems caused by disposal, materials, destruction of the environment by the accumulation of waste in toilets or inadequate disposal sites. Research has shown the potential of waste in construction. This potential content is using the use for sustainable use to use in use-to-use-to-use the use of the new solutions. In this context, glass materials, abound in urban centers, are found in bottles, moisturizers, cups and dishes, and are discarded after the break. In the environment is the environment of 4 months for the wide decomposition in the environment approve the aprovechitorisation. The work was revised as: To quantify waste in Brazil and in the world; study of waste processing; study of its use in concrete; carried out a bibliographical research in scientific databases (*Scopus, Web of Science, Village of Engineering and Direct Science*); the collected data were collected to identify the properties and the durability parameters of the concrete that incorporates the residue; and were found statistically, when possible, those found by the authors. The results obtained for this procedure were selected according to the selected theme and the research of the researches in the area.

**Key-words:** glass, residues, concrete, gap.



## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os subprodutos da interação humana, o vidro tem lugar de destaque pela profusão de aplicabilidade sendo empregado em diversos formatos, dimensões e cores, atendendo a variedades de áreas desde cosméticos, utensílios, indústria automobilística até à construção civil. Com relevante faixa de exploração dos tipos de vidro, o aumento proporcional do descarte deste material tornou-se inevitável, causando um passível ambiental irrestrito que pode demandar milhares de anos para inteira decomposição, principalmente em situações que o descarte ocorre de maneira irregular na natureza.

De forma análoga ao material supracitado em exploração, tem-se o concreto como o produto não natural mais consumido pelo homem, produzido a partir da associação de materiais variados <sup>(1)</sup>. O melhoramento das propriedades e consequente desempenho do concreto estão relacionados às características dos materiais empregados na mistura. Nos últimos anos, estudos têm demonstrado o potencial de emprego de resíduos diversos em busca do melhoramento das propriedades de uma determinada matriz, como é o caso dos resíduos de vidro no concreto <sup>(2)</sup>.

Materiais silicosos como é o caso do vidro têm grande capacidade de inserção no concreto devido ao potencial pozolânico, contudo a inserção indiscriminada destes pode levar a reações indesejadas na matriz cimentícia, oriundos da própria sílica. A pozolanicidade atua em direção ao melhoramento das características do concreto, que tem sido observada com melhor desempenho em resíduos de vidro com menor diâmetro <sup>(3)</sup>.

O processo de fabricação dos mais variados produtos da indústria vidreira em fase inicial é muito similar, o que inclui desde as matérias prima adotadas aos processos físicos e químicos do processo. A sílica representa 70% da matéria base do vidro, seguido de barrilha (15%), calcário (10%), dentre outros materiais que irão ajudar na composição final do produto <sup>(4)</sup>. Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano, as usinas brasileiras têm capacidade para produção de 6680 toneladas de vidro por dia <sup>(5)</sup>.

De acordo com a agência norte-americana de proteção ambiental (*Environmental Protection Agency*), somente no ano de 2013 os USA produziram 11,5 milhões de toneladas de resíduos de vidro, grande parte deles oriundos das garrafas de refrigerantes. Embora entre os anos de 1980 e 2013 ocorreu um aumento de 400% na taxa de reciclagem dos resíduos de vidro, mais de 74% de



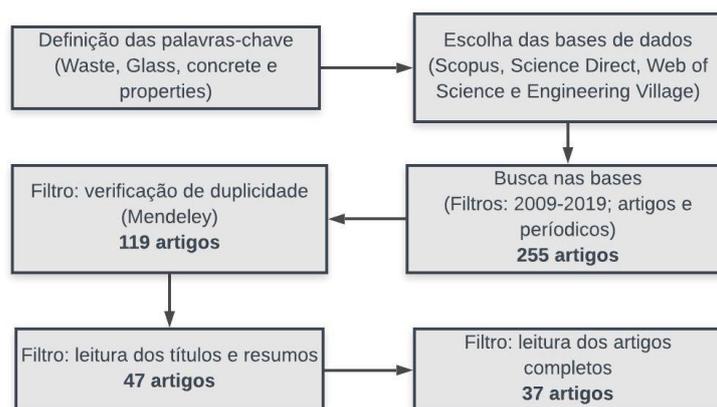
todo vidro gerado nos Estados Unidos ainda continua a ser descartado em aterros <sup>(6)</sup>. No Egito, anualmente são gerados 3,45 milhões de toneladas de resíduos e 84% destes são dispostos em aterros após utilização<sup>(7)</sup>.

O estudo em questão realizou revisões bibliográficas a respeito do emprego dos resíduos de vidro no concreto nas bases de dados. Desta maneira foi possível estabelecer as lacunas dentro do conhecimento científico, áreas de pouca ou nenhuma exploração a respeito da inserção dos resíduos de vidro no concreto.

## 2. METODOLOGIA

O desenvolvimento metodológico deu-se a partir da aplicação do método para seleção de portfólio bibliográfico: o *Proknow-C*. Neste método são considerados apenas artigos publicados na língua inglesa e em revistas conceituadas, não sendo levantadas as dissertações, teses ou artigos de congressos <sup>(8)</sup>. O *Proknow-C* consiste em uma série de procedimentos aplicados desde as etapas de definição dos mecanismos de busca de artigos científicos para a pesquisa, com uma série de procedimento pré-estabelecidos até chegar à filtragem e seleção do portfólio bibliográfico, no qual restarão apenas os artigos mais relevantes na área <sup>(9)</sup>.

**Figura 1:** Procedimento metodológico aplicado ao objeto de estudo com base no *Proknow-C*.



**Fonte:** Os autores, 2019.

Para escolha das palavras chaves e posteriormente aplicação do método Proknow-C, definiram-se dois eixos para criação das palavras-chave, conforme método empregado. No primeiro eixo, constavam os termos relativos às propriedades mecânicas, físicas entre outras do objeto de estudo e no segundo eixo, selecionou-se termos relacionados ao material estudado, suas propriedades e



implicações. Com as palavras-chave definidas e a escolha das bases de dados foi possível aplicar o método de seleção de dados seguindo os passos discretizados na Figura 1.

Inicialmente, definidas as palavras-chave e as bases de dados, realizou-se uma seleção no mecanismo de busca avançada das plataformas. Isto possibilitou selecionar apenas artigos científicos em revistas dos últimos dez anos e aqueles no qual as palavras-chaves foram citadas pelos autores. Os 255 artigos foram selecionados e seus dados foram exportados.

Posteriormente, o tratamento dos artigos deu-se com auxílio computacional, através da ferramenta *Mendeley*. Com os dados exportados das bases foi possível verificar a duplicidade dos artigos após a interação destes no *Mendeley*, resultando em 119 artigos. Em seguida, verificou-se a pertinência das palavras-chave adotadas, a partir da leitura dos títulos e resumos dos artigos, onde obteve-se 47 artigos. Por fim, realizou-se a leitura completa dos trabalhos chegando-se ao resultado de 37 artigos.

### **3. RESULTADOS**

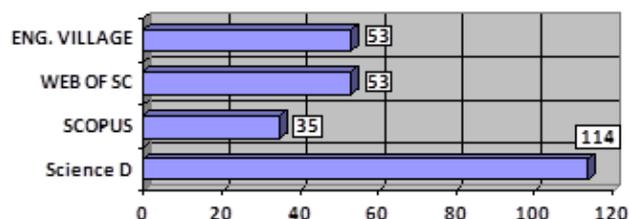
#### **3.1 ANÁLISE DOS BANCOS DE DADOS**

O método de pesquisa avançado foi imposto ao processo de busca para obter uma melhor seleção dos resultados dos artigos encontrados. As bases de dados adotadas neste estudo possibilitam a busca aprimorada a partir de termos, palavras chave, ano de publicação, autores, entre outros. Com isto, foi possível restringir os resultados obtidos com base em fatores relevantes para o estudo proposto.

O trabalho em questão buscou levantar dados do estado da arte com relação ao emprego dos resíduos de vidro na produção de concreto, isto possibilitou delimitar recortes em relação ao objeto de pesquisa. Foi adicionado então, o fator tempo/ano de publicação como limitador dos resultados, sendo considerados apenas trabalhos entre os últimos dez anos (2009 a 2019) e de livre acesso através da plataforma pesquisada. Junto a estes limitadores, também foi usado o filtro para buscar apenas artigos científicos. Nas bases de dados adotadas, os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 2.



**Figura 2:** Quantidade de artigos selecionados com base nos filtros aplicados.



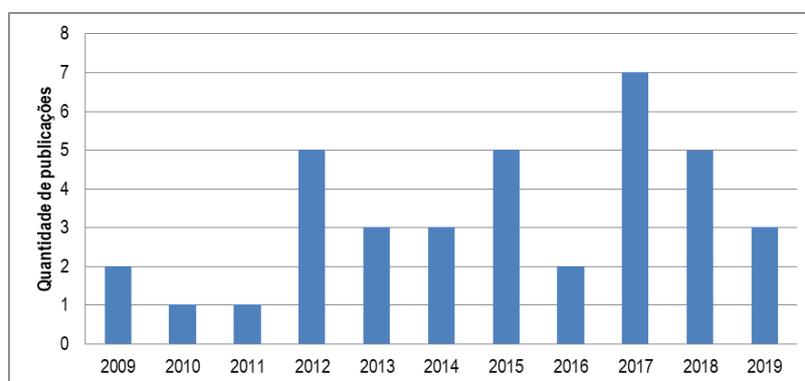
Fonte: Os autores, 2019.

Mesmo com os filtros supracitados, os dados obtidos mantiveram-se abrangente, contemplando resultados que não eram interessantes ao objetivo da pesquisa. E, por último, foi aplicado às bases de dados mais um filtro para seleção dos artigos. Desta vez, apenas artigos cujos termos iniciais adotados estavam contidos nas palavras-chave citadas pelos autores foram considerados, levando a uma redução acentuada e mais próxima dos resultados desejados para análise.

### 3.2 ANÁLISE POR ANO DE PUBLICAÇÃO

Para o intervalo de tempo adotado neste estudo que foi de 2009 a 2019, observa-se na Figura 3 a relação na quantidade de produção científica relacionada ao tema para cada respectivo ano. Desta forma, é possível observar que o ano de 2017 foi o que apresentou a maior quantidade de publicações em torno do tema. É louvável a observação de que o ano de 2019, ainda corrente, poderá sofrer alteração na quantidade de trabalhos e que sua análise é parcial cobrindo apenas os 5 primeiros meses do ano de 2019.

**Figura 3:** Produção relacionada ao período de 2009 - 2019.



Fonte: Os autores, 2019.

Neste contexto, observa-se que, embora intercalada variação de produção, os últimos anos têm apresentado um crescente aumento nas pesquisas relativas à inserção de vidro no concreto. Após o

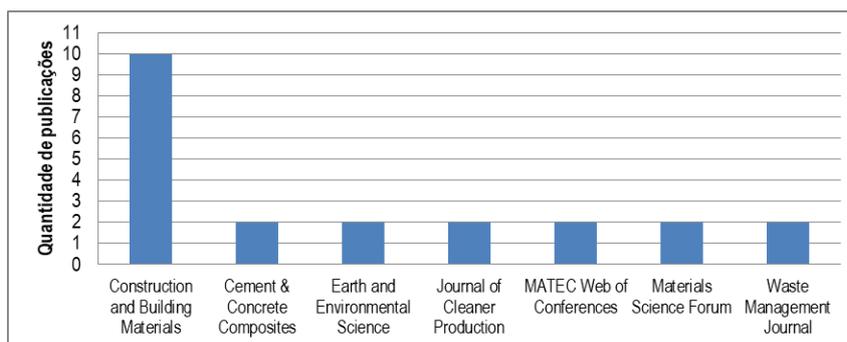


ano de 2012, há uma pequena variação na produção do ano seguinte, seguido de um crescimento no número de pesquisas e uma nova queda em 2016.

### 3.3 ANÁLISE POR PERIÓDICO

Na busca por compreender os números em torno dos principais periódicos internacionais que publicaram com relação à inserção de resíduos de vidro concreto, observou-se que 25 periódicos publicaram trabalhos sobre o tema, sendo que somente a revista *Construction and Building Materials* teve uma disparidade em relação as demais, com um total de 10 publicações, sendo responsável por 27% das publicações no tema estudado, as outras revistas seguiram uma linha constante de duas publicações cada. A Figura 4 demonstra a relação entre o número de publicações e os periódicos mais produtivos dentre os encontrados.

Figura 4: Produção relacionada ao periódico.



Fonte: Os autores, 2019.

Nota: Para a construção do gráfico acima, considerou-se apenas os periódicos com duas ou mais publicações sobre o tema em questão, sendo que o quantitativo total de publicações presente no gráfico é de 25. Este valor não corresponde ao total de artigos selecionados para a bibliometria que foi de 37. Além disso, o levantamento bibliométrico constatou um total de 22 periódicos que já haviam publicado pelo menos uma vez sobre o tema de inserção de resíduos de vidro no concreto, sendo eles: *Construction and Building Materials*; *ACI Materials Journal*; *Cement & Concrete Composites*; *Earth and Environmental Science*; *Earth and Environmental Science*; *Journal of Cleaner Production*; *MATEC Web of Conferences*; *Materials Science Forum*; *Waste Management Journal*; *Procedia Engineering*; *Construction Materials*; *Construction Science*; *Energy Procedia*; *European Journal of Environmental and Civil Engineering*; *International Journal of Environment and Waste Management*; *International Journal of Sustainable Built Environment*; *Journal of Advanced Concrete Technology*; *Journal of Building Engineering*; *Materials Science and Engineering*; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*; *Structures and Buildings*; *Sustainable Cities and Society journal*; *The Open Civil Engineering Journal*.

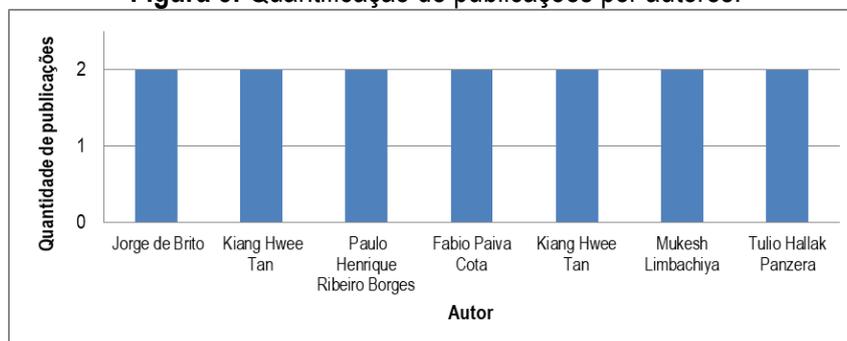
### 3.4 ANÁLISE POR AUTOR

Para análise dos autores que abordam o tema estudado, foram identificados 126 pesquisadores, com apenas 7 deles tendo 2 publicações, conforme a Figura 5. Assim, os demais (119 autores) apresentaram apenas uma publicação relacionada ao tema e não foram considerados pela figura a seguir. Observa-se que apenas 6,3% dos autores demonstram constância em relação à produção



de artigos relacionados à inserção de resíduos de vidro no concreto para uma análise dos últimos dez anos.

**Figura 5:** Quantificação de publicações por autores.



**Fonte:** Os autores, 2019.

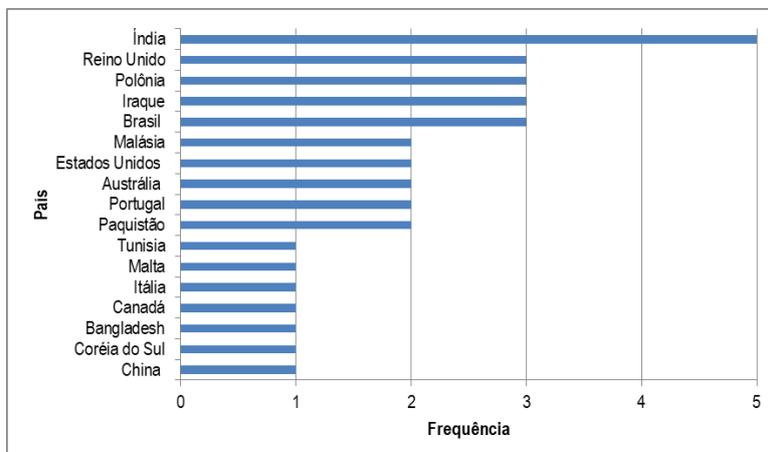
Nota: O levantamento bibliométrico apresentou somente os autores que tiveram duas publicações nos últimos 10 anos, além disto constatou que 118 autores tiveram pelo menos uma publicação nos últimos 10 anos, estes foram excluídos, pois o gráfico não seria possível ter clareza nos dados do gráfico. Os 118 autores com uma publicação são: A Pietrzak; A. Khmiri; A.E.M. Paiva; Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty; Abdelhamid Guettala; Afia Hazzaq; Ahmad Rasidi Osman; Ahmed Y. Aboshama; Aleksandrs Korjakins; Ali A. Aliabdo; Alina Mahmood; Alireza Mohammadinia; Aloizio Geraldo Araújo; Anna Kotwa; Antonio Sabariz; Arul Arulrajah; Asad Hanif; Aseel B. AL-Zubaid; Aynoor Ibrahim Ali; B. Samet; B. Vidivelli; C. Venkatasubramanian; Caio Cesar Damas Melo; Chao-Qun Lye; D. Muthu; Diogo Serpa; E.J.P. Miranda Júnior; E.N.L. Rodrigues; Enas A. AL-Hashmi; Eun Ik Yang; Fabio Paiva Cota; Fabio Paiva Cota; Fabrizio Scarpa; Fadluhartini Muftah; G. M. Sadiqul Islam; G. Pugazhmani; Gurmel S. Ghataora; Hafiz Abrar Ahmad; Hamid Zeroub; Harshad C Patel; Hongjian Du; Hongjian Du; Hongseob Oh; Hyeonggi Lee; Il Sun Kim; J Pontes; Jongsung Sim; Jorge de Brito; Jorge de Brito; José B. Aguiar; Josette Camilleri; Josmar Cassar; K. Ramakrishnan; Kadum Muttar Shabeeb; Kaveh Afshinnia; Khuram Rashid; Kiang Hwee Tan; Kiang Hwee Tan; Kirils Kovalenko; Kunal Bisht; Luca Bertolini; M Ulewicz; M. Chaabouni; M. H. Rahman; M. Mageswari; Maddalena Carsana; Madiha Ahmad; Massimiliano Frassoni; Mian Sun; ML Benmalek; Mohammed Seddik Meddah; Mohd Syahrul Hisyam Mohd Sani; Muhammad Usman; Mukesh C. Limbachiya; Mukesh Limbachiya; N Unnikrishnan; Nayem Kazi; Nazar Al Obeidy; Norlia Mohamad Ibrahim; Nur Liza Rahim; P Bhuvaneshwari; P Rajagopalan; P.V. Ramana; Parviz Soroushian; Patricija Kara; Patrick L Maier; Paulo Henrique Ribeiro Borges; Prasada Rao Rangaraju; R. Sripragadeesh; Rabah Chaid; Raoul Jauberthie; Ravindra K. Dhir; Rizwan Hameed; Roshazita Che Amat; Roz-Ud-Din Nassar; S.E. Chidiac; S.N. Mihaljevic; Saïd Kenai; Samiha Ramdani; Sara de Castro; Sejal P Dalal; Shamshinar Salehuddin; So Yeong Choi; Soumela Fotiadou; Stephan A Durham; Suksun Horpibulsuk; T H Panzera; T JainulHaq; Tao Sun; Tulio Hallak Panzera; V Balaji; Wasan Khalil; Weiwei Han; Xinping Li; Yani Lu; Yat Choy Wong; Zainab Z. Ismail.

### 3.5 ANÁLISE DE PUBLICAÇÕES POR PAÍS

A análise bibliográfica constatou que ao todo 22 países realizaram pesquisas na última década relacionadas à inserção de resíduos de vidro no concreto. Sendo que 19 países realizaram a pesquisa sem necessidade de cooperação com outros países. A Figura 6 demonstra a quantidade de publicações realizadas pelos 19 países sobre o tema estudados nos últimos dez anos.



**Figura 6:** Análise da publicação por países.

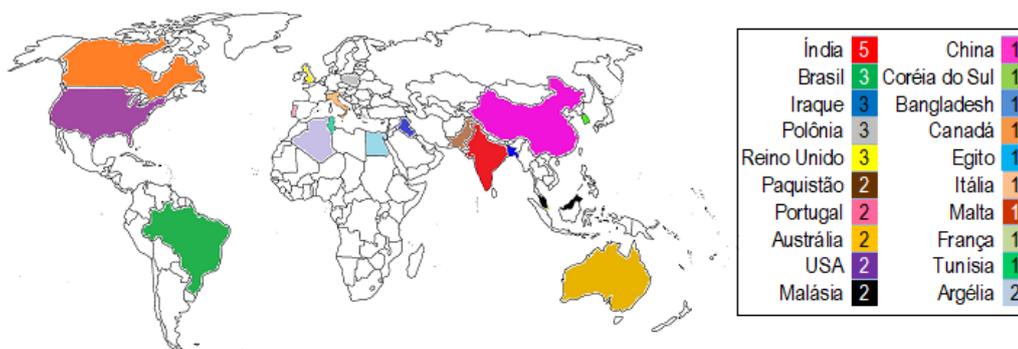


**Fonte:** Os autores, 2019.

Nota: É necessário ressaltar que 3 trabalhos foram realizados em cooperação internacional, sendo um deles produzidos por Coreia do Sul, China e Paquistão, o segundo produzido por Argélia em conjunto com Portugal e o terceiro estudo foi feito por Argélia e França, por isto o total acumulado presente no gráfico não corresponde aos 37 artigos selecionados para a elaboração da bibliometria deste estudo.

O mapa a seguir na Figura 7, demonstra a produção de artigos no tema estudado realizada por todos os países levantados na bibliometria no últimos dez anos.

**Figura 7:** Mapa da produção de artigos por país.



**Fonte:** Os autores, 2019.

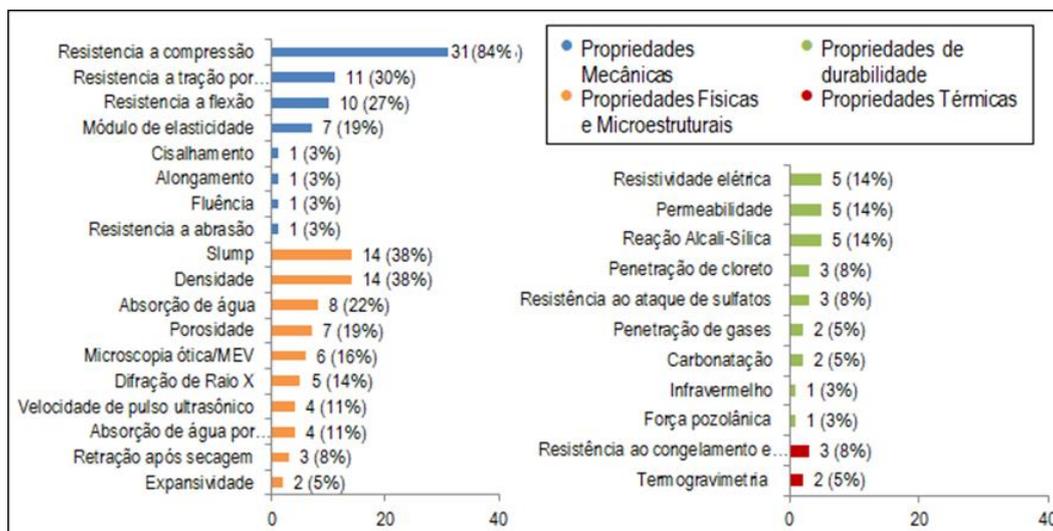
### 3.6 PRINCIPAIS PROPRIEDADES ANALISADAS NO ARTIGOS

Dos 37 artigos selecionados, selecionou-se 15 ensaios mais significativos agrupados em 5 tipos de propriedades. Sendo as propriedades mecânicas, térmicas, físicas, análise de microestrutura e parâmetros quanto a durabilidade devido a inserção dos resíduos de vidro no concreto. A Figura 8 demonstra o gráfico de frequência de ensaio e tipo, sendo que no eixo da abcissa encontra-se a frequência de cada ensaio no total de artigos e no eixo da ordenada encontra-se o tipo de ensaio.



Com isto pode-se observar que o ensaio de resistência a compressão axial do concreto em estudo teve o valor discrepante em relação aos demais, possuindo a maior frequência e maior representatividade.

**Figura 8:** Gráfico da frequência por tipo de ensaio realizado.



Fonte: Os autores, 2019.

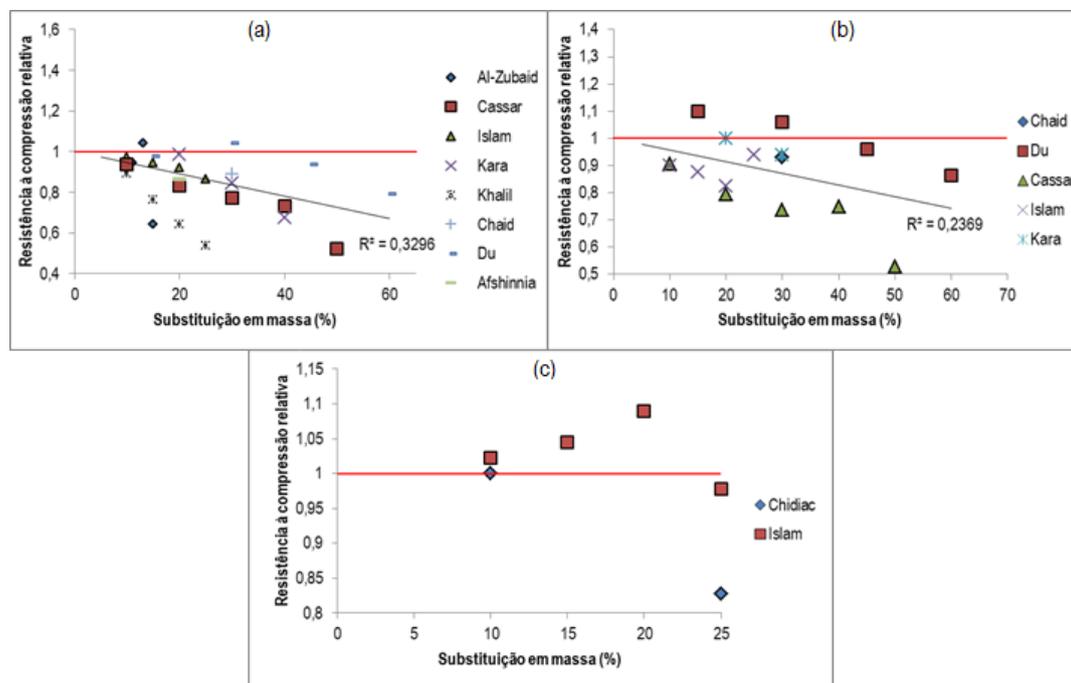
### 3.7 ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para cada um dos ensaios selecionados, originou-se gráficos de dispersão no software Excel, no qual cada ponto representou um valor encontrado por determinado(s) autor(es), sendo a coordenada abscissa correspondente a porcentagem de resíduo utilizado no concreto e a coordenada ordenada representa o valor relativo da propriedade estudada, isto é, os valores encontrados com a substituição, por cada autor em relação aos valores dos corpos de prova de referência ou controle de cada autor. Esses gráficos serviram como base para as discussões presentes nos resultados.

Devido ao seu potencial pozolânico, estudos que analisam a resistência à compressão do concreto com idades maiores podem demonstrar o potencial de melhoria das propriedades mecânicas do concreto com de resíduo de vidro. Neste estudo, foram avaliados os resultados dos autores para a resistência à compressão do concreto com 28, 90 e 365 dias, como mostrado nas Figura 9 e 10.



**Figura 9:** Resistência à compressão relativa para substituição no cimento com (a) 28 dias, (b) 90 dias e (c) 365 dias.



Fonte: Os autores, 2019.

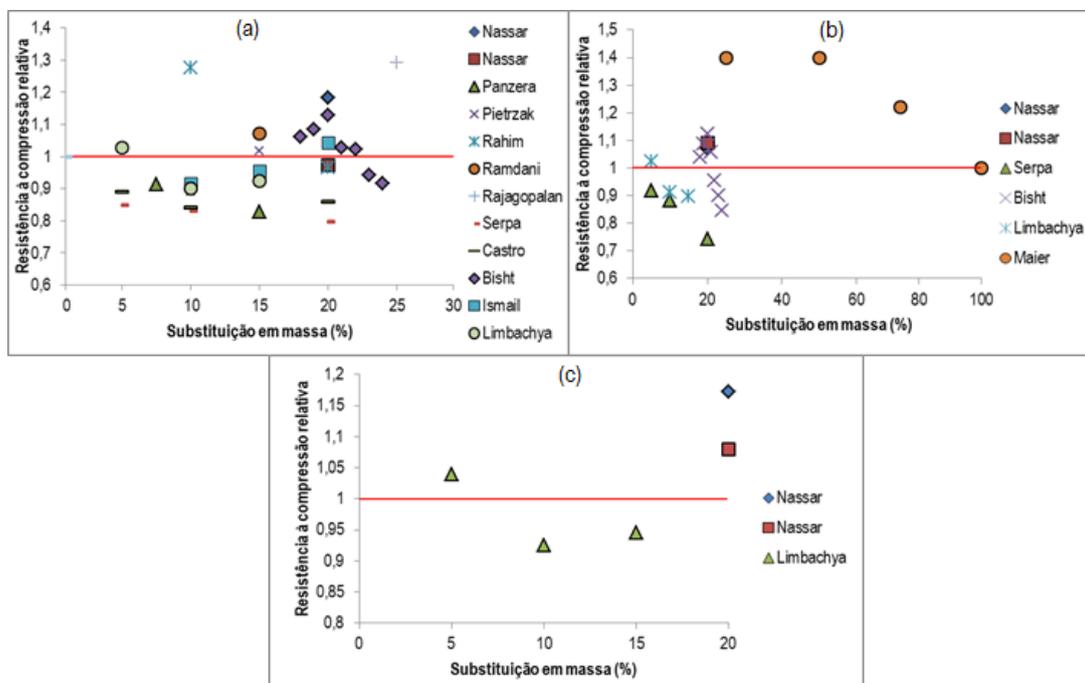
Conforme a Figura 9a, 8 autores analisaram a substituição do cimento pelo resíduo de vidro com 28 dias. Embora em estágio inicial, os resultados superaram a resistência da referência em alguns casos. De modo geral, a tendência da substituição pelo resíduo de vidro no concreto foi de diminuição da resistência à compressão, como indicado pela linha de regressão. Observ-se também que, os teores de substituição do cimento atingiram 60%. Embora esta análise tenha demonstrado levar à efeitos deletérios no concreto é importante ressaltar que realizado o estudo cria-se uma possibilidade de análise e aprofundamento em busca da verificação das causas do mau desempenho da matriz.

Em relação a resistência à compressão para o concreto com substituição parcial do cimento, apenas 5 artigos estudaram esta propriedade com a idade de 90 dias. No entanto, em relação a referência, apenas um trabalho demonstrou melhoria nas propriedade, com substituição de 18% e 30%, conforme Figura 9b.

Para a resistência à compressão para o concreto com substituição parcial do cimento com 365 dias de idade, apenas 2 artigos avaliaram esta propriedade nesta idade. O trabalho de Islam demonstrou melhorias na substituição do cimento entre 10% e 20%, enquanto Chidiac obteve uma perda nas propriedades quando efetuou a substituição na proporção de 25%, conforme Figura 9c.



**Figura 10:** Resistência à compressão relativa para substituição de agregado miúdo com (a) 28 dias, (b) 90 dias e (c) 365 dias.



**Fonte:** Os autores, 2019.

Para substituição como agregado miúdo para a idade de 28 dias, os autores em estudo apontaram porcentagens inferiores à 25%, em referência à autores anteriores que indicaram o baixo desempenho para teores maiores que o limite encontrado. No entanto, alguns estudos obtiveram resultados de melhoria para percentuais de substituição do agregado miúdo entre 15% e 25%, conforme Figura 10a.

Em relação a idade de 90 dias, foram encontrados 6 artigos. Em relação a referência, os resultados se mostraram mais eficazes do que com a substituição no cimento, com apenas um trabalho não demonstrando melhoria na propriedade mecânica. Vale destacar o trabalho de Maier, onde houve 100% da substituição do agregado miúdo e suas propriedades foram iguais à referência, demonstrando também grande melhoria para a substituição nos percentuais de 25%, 50% e 75%, conforme Figura 10b.

Quando a resistência à compressão para o concreto com substituição parcial do agregado miúdo com 365 dias de idade, foram encontrados 3 trabalhos que avaliaram esta propriedade seguindo este parâmetro de idade. Destes trabalhos, os três demonstraram melhorias na resistência à compressão, nos percentuais de 5% e 20%, conforme Figura 10c.



## 4. Conclusões e recomendações

Diante do levantamento bibliométricos e análise realizada neste trabalho, com relação à substituição de cimento por agregado miúdo, permite-se concluir que:

- As lacunas avaliadas foram referente aos ensaios com frequência de 1 a 3, que representam de 3% a 8%, ou seja, os ensaios menos realizados nos trabalhos encontrados nos últimos 10 anos. E com isto, as pesquisas científicas devem focar mais nestes ensaios, para se alcançar uma padronização nos resultados dos ensaios.
- Observa-se as lacunas referentes aos ensaios de cisalhamento, alongamento, fluência, resistência a abrasão, retração após secagem, expansividade, penetração de cloretos, ataque de sulfatos, profundidade de carbonatação, infravermelho, força pozolânica, resistência ao congelamento e ao descongelamento e termogravimetria.
- A análise executada neste artigo gera parâmetros mais confiáveis e eficazes para as pesquisas sobre concreto com vidro, pois o estudo demonstra com clareza o comportamento das pesquisas referente ao material que se deseja estudar.

A inserção dos resíduos de vidro no concreto como parte a substituição dos teores de cimento com 28 dias podem apresentar bons desempenhos em estágio inicial, ainda que não se atinja às resistências de referência;

- A inserção dos resíduos de vidro no concreto como substituição parcial do agregado miúdo com 28 dias apresentam melhores resultados relacionados a substituição do cimento, onde a uma boa parte dos estudos demonstram melhoria na resistência à compressão em relação a referência;
- A avaliação dos trabalhos com 90 e 365 demonstrou o potencial pozolânico do resíduo de vidro em alguns trabalhos, permitindo a melhoria da resistência a compressão do concreto em relação á referencia e aos trabalhos que avaliaram a resistência à compressão com 28 dias. No entanto, carecem mais estudos para avaliar efetivamente a capacidade deste resíduo de melhoria nas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e outras.
- Propõe-se realizar análises sobre o ciclo de vida do tipo de concreto em estudo.



## 6. REFERÊNCIAS

1. PEDROSO, F. L. Concreto: As origens e a evolução do material construtivo mais utilizado pelo homem. P. 14 – 19. In:\_\_\_\_\_ **Concreto: Material construtivo mais consumido pelo homem**. 2010. Revista IBRACON: Concreto e construções. Nº 53. ISSN: 1809-7197.
2. SAUER, A. S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassa de recuperação estrutural**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Dissertação de Mestrado). Vitória - ES, 2013.
3. IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. **Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars**. Construction and Building Materials, v. 24, p. 1309-1312, 2010.
4. FREIRE, L. L. R. **A indústria de vidros planos**. Caderno Setorial – ETENE. Nº 3, ano 1, novembro, 2016.
5. KHMIRI, A. CHAABOUNI, M. SAMET, B. **Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars**. Construction and Building Materials, v. 44, p. 74-80, 2013.
6. How Do I Recycle?: Common Recyclables. **UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. Disponível em: <https://www.epa.gov/recycle/how-do-i-recycle-common-recyclables#gla>. Acesso em: 06 de Junho de 2019.
7. How Do I Recycle?: Common Recyclables. **UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. Disponível em: <https://www.epa.gov/recycle/how-do-i-recycle-common-recyclables#gla>. Acesso em: 06 de Junho de 2019.
8. VILELA, LÍLIAN DE OLIVEIRA. **Aplicação do Proknow-c para seleção de um portfólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento**. Revista Gestão Industrial, v.08, p. 76 – 92, 2012.
9. AFONSO, M. H. F. et al.,. **Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-c na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável**. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 5, n. 02, p. 47 – 62, 2011.
10. AFSHINNIA, G.RANGARAJU, P. R. **Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of portland cement concrete**. Construction and Building Materials, v, 117, p. 263 - 272, 2016.
11. ALIABDO, A. et al. **Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete**. Construction and Building Materials, v. 124, p. 866 – 877, 2016.
12. AL-ZUBAID, A. B. et. al. **Study the effect of recycled glass on the mechanical properties of green concret**. Procedia Energy, v. 119, p. 680 - 692, 2017.
13. BISHT, K. RAMANA, P. V. **Sustainable production of concrete containing discarded beverage glassas fine aggregate**. Construction and Building Materials, v. 177, p. 116 – 124, 2018.
14. CARSANA, M. FRASSONI, M. BERTOLINE, L. **Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials**. Cement e concrete composites, v. 45, p. 39 – 45, 2014.



15. CASSAR, J. CAMILLERE, J. **Utilization of imploded glass in structural concrete.** Construction and Building Materials, v. 29, p. 299 – 307, 2012.
16. CASTRO, S. BRITO, J. **Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates.** Journal of Cleaner Production, v. 41, p. 7 – 14, 2013.
17. CHAID, R. et al. **Microstructure and permeability of concrete with glass powder addition conserved in the sulphatic environment.** European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 19, p. 219 – 237, 2015.
18. COTA, F. et al. **Mechanical properties and ASR evaluation of concrete tiles with waste glass aggregate.** Sustainable Cities and Society, v. 16, p. 49 – 56, 2015.
19. DU, H. TAN, K. H. **Concrete with recycled glass as fine aggregates.** Aci Materials Journal, v. 111, p. 47 – 57, 2014.
20. LIMBACHIYA, M. et al. **Performance of granulated foam glass concrete.** Construction and Building Materials, v. 28, p. 759 – 768, 2012.
21. DU, H. TAN, K. H. **Waste glass powder as cement replacement in concrete.** Journal of advanced concrete technology, v. 12, p. 468 – 477, 2014.
22. HAN, W. **Using of borosilicate glass waste as a cement additive.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, v. 381, p. 11 -15, 2016.
23. ISLAM, G. M. RAHMAN, M. H. KAZI, N. **Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice.** International Journal of Sustainable Built Environment, v. 6, p. 17 – 44, 2017.
24. ISMAIL, Z. Z. AL-HASMI, E. A. **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.** Waste Management, v. 29, p. 655 – 659, 2009.
25. KARA, P. et al. **The usage of fluorescent waste glass powder in concrete.** Construction Science, v. 13, 2013.
26. KHALIL, W. OBEIDY, N. A. **Some properties of sustainable concrete containing two environmental wastes.** MATEC Web of Conferences, v. 162, 2018.
27. KHMIRI, A. et al. **A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement.** Construction and Building Materials, v. 28, p. 680 – 686, 2012.
28. KIM, I. S. et al. **Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate.** Construction and Building Materials, v. 184, p. 269 – 277, 2018.
29. KOTWA, A. **Parameters of concrete modified with glass meal and chalcedonite dust.** IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v. 245, 2017.
30. LIMBACHIYA, M. C. **Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, p. 1078 – 1083, 2009.
31. LYE, C. DHIR, R. K. **Deformation of concrete made with crushed recycled glass cullet fine aggregate.** Structures and Buildings, v. 170, p. 321 – 335, 2017.
32. MAGESWARI, M. VIDIVELLI, B. **The use of sheet glass powder as fine aggregate replacement in concrete.** The Open Civil Engineering Journal, v. 4, p. 65 – 71, 2010.
33. MAIER, P. L. DURHAM, S. A. **Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures.** Construction and Building Materials, v. 29, p. 428 – 437, 2012.



34. MIRANDA, E. J. P. PAIVA, A. E. M. RODRIGUES, E. V. L. **Influence of waste glass on the physical properties of portland cement concrete.** *Materials Science Forum*, v, 798, p. 576 – 571, 2014.
35. MOHAMMADINIA, A. et al. **Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths.** *Construction and Building Materials*, v. 197, p. 489 – 496, 2019.
36. NASSAR, R. SOROUSHIAN, P. **Use of milled waste glass in recycled aggregate concrete.** *Proceedings of the Institution of Civil Engineers:Construction Materials*, v. 166, p. 304 – 3015, 2013.
37. PANZERA, T. H. et al. **Recycled glass as potential aggregate for concrete tiles: a statistical analysis of the physical and engineering properties.** *Int. J. Environment and Waste Management*, v. 12, n. 8, p. 280 – 299, 2013.
38. PIETRZAK, A. ULEWICZ, M. **The influence of addition of crt glass cullet on selected parameters of concrete composites.** *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019.
39. RAHIM, N. L. et al. **Utilization of recycled glass waste as partial replacement of fine aggregate in concrete production.** *Materials Science Forum*, v. 803, p. 16 – 20.
40. RAMAKRISHNAN, K. et al. **Experimental study on the mechanical and durability properties of concrete with waste glass powder and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious materials.** *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 739 – 749, 2017.
41. RAMDANI, S. et al. **Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder.** *Journal of Building Engineering*, v. 21, p. 302 – 311, 2019.
42. RASHID, K. et al. **Analytical framework for value added utilization of glass waste in concrete: mechanical and environmental performance.** *Waste Management*, v. 79, p. 312 – 323, 2018.
43. SANI, M. S. H. M. et al. **Investigation on compressive strength of special concrete made with crushed waste glass.** *MATEC*, v. 27, p. 1 - 5, 2015.
44. RAJAGOPALAN, P. et al. **Study of bond characteristics of reinforced waste glass aggregate concrete.** *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 80, p. 1 - 8, 2017.
45. SERPA, D. BRITO, J. PONTES, J. **Concrete made with recycled glass aggregates: mechanical performance.** *Aci Materials Journal*, DOI: 10.14359/51687366, 2015.



## ESTUDO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE FIBRAS DE COCO EM ARGAMASSAS

Raylane de Souza Castoldi <sup>(1)</sup>; Sayonara Maria Moraes Pinheiro <sup>(2)</sup>

(1) UFES – raylanecastoldi@gmail.com; (2) UFES – sayonara.pinheiro@gmail.com

### RESUMO

A construção civil é um dos setores responsáveis por grande consumo de recursos naturais e elevada geração de resíduo. Um dos grandes desafios é a implementação de ações direcionadas para o desenvolvimento sustentável do setor, com foco na redução da utilização de matérias-primas não renováveis e no reaproveitamento de resíduos. O presente estudo visa à avaliação da viabilidade do aproveitamento do resíduo agroindustrial fibra de coco verde, para uso como reforço discreto em argamassas de cimento Portland. Esse resíduo apresenta alta disponibilidade e é disponível a baixo custo. Entretanto, muitas vezes esse material não tem um destino adequado, tornando-se um problema ambiental. Portanto, o estudo teve como foco o entendimento do processo de geração e caracterização do resíduo, seguido do desenvolvimento do processo de obtenção das fibras a partir do coco verde e, por fim, a produção e avaliação do produto final. Foram produzidas argamassas reforçadas com fibras de 25 mm de comprimento, com dosagens de 0,3, 0,6 e 1% em volume. A viabilidade técnica foi avaliada por ensaios no estado fresco (ensaio de consistência) e endurecido, pela avaliação mecânica a partir de ensaios de compressão e flexão. Os resultados apontam para a possibilidade do uso de fibras de coco como reforço em argamassa na construção civil.

**Palavras-chave:** fibra de coco, resíduo agroindustrial, argamassa.

## FEASIBILITY STUDY ON THE APPLICATION OF COCONUT FIBERS IN MORTARS

### ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors responsible for high consumption of materials from natural resources and high generation of waste. One of the major challenges is the implementation of actions focused on the sustainable development of the sector, by reducing the use of non-renewable materials and the reuse of waste. The present study aims to evaluate the viability of the use of the agroindustrial residue coconut fiber as discrete reinforcement in Portland cement mortars. This residue is highly available and has a low cost. However, this material usually does not have an adequate destination, becoming an environmental problem. Therefore, the study focused on the understanding of the generation process and characterization of the residue, followed by the development of the process of obtaining the fibers from the green coconut and, finally, the production and evaluation of the final product. The mortars were reinforced with fibers with 25 mm long and were used at dosages of 0.3, 0.6 and 1% by volume in the mortars. The technical feasibility was evaluated by tests in the fresh state (consistency test) and hardened, by mechanical evaluation from compression and bending tests. The results show that the use of coconut fibers as reinforcement in mortars is technically possible.

**Key-words:** coconut fiber, agroindustrial residue, mortar.



## 1. INTRODUÇÃO

As atividades da construção civil são relevantes, tanto social quanto economicamente, e abrange toda a sua cadeia produtiva. Dentro do panorama geral da economia brasileira, o setor da construção civil representou 5,1% do Produto Interno Bruto (PIB) em 2018 <sup>(1)</sup>. Em 2016, o setor possuía cerca de 8 milhões de trabalhadores, representando 8% de toda a população empregada do país, evidenciando sua importância dentro do âmbito social <sup>(1)</sup>. Por outro lado, a construção civil é responsável por uma grande parcela do total de consumo de recursos naturais e apresenta uma elevada quantidade de geração de resíduos <sup>(2)</sup>. Portanto, um dos grandes desafios atuais do setor é a implementação de ações efetivas direcionadas para a redução do impacto ambiental e o seu desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável é fundamentado no atendimento às necessidades de recursos naturais das presentes gerações, sem comprometer a capacidade de atendimento às necessidades das gerações futuras <sup>(3)</sup>. Sendo assim, o setor construtivo pode contribuir com esse desenvolvimento, principalmente no que concerne ao aproveitamento de resíduos, transformando-os em subprodutos. Portanto, é importante o incentivo a novas soluções tecnológicas com dupla finalidade: a redução da utilização de matérias-primas não renováveis e o reaproveitamento de resíduos. Cabe aos pesquisadores a responsabilidade de encontrar soluções econômica e tecnologicamente viáveis para a transformação dos resíduos em produtos aplicáveis na construção civil, reduzindo seu impacto ambiental.

Segundo John e Ângulo (2003) <sup>(4)</sup>, o desenvolvimento metodológico para o estudo do uso e da reciclagem de resíduos na construção civil deve ser constituído de cinco etapas: entendimento do processo de geração do resíduo; caracterização do resíduo; seleção de usos potenciais para os resíduos; desenvolvimento e avaliação do produto, quanto aos aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Neste sentido, muitas vezes é necessário um esforço multidisciplinar entre as grandes áreas do conhecimento para viabilizar a utilização do resíduo <sup>(3)</sup>.

Atualmente, a utilização de fibras naturais em elementos construtivos desponta como material de reforço a ser utilizado em compósitos cimentícios destinados à produção de componentes para a construção civil <sup>(3,5)</sup>. As fibras naturais, em geral, são resíduos de atividades agroindustriais, existem em larga escala e apresentam diversas vantagens, como o fato de serem renováveis, biodegradáveis e disponíveis a baixo custo <sup>(6)</sup>. No Brasil, há disponibilidade de uma diversidade



muito grande de fibras, entre elas, desponta a fibra de coco. Durante as atividades de comercialização do coco – polpa e água, uma grande quantidade de resíduos, formado por casca e fibra, é gerada, fazendo-se necessário um estudo aprimorado para uma destinação mais nobre a esse resíduo <sup>(3,7,8)</sup>.

Estudos iniciais relacionados à adição de fibras de coco em matrizes cimentícias, inclusive argamassas e concretos <sup>(9,10)</sup>, relatam melhora no comportamento mecânico, aumentando a resistência à tração; redução da formação das fissuras, contribuindo para o aumento da sua durabilidade <sup>(6)</sup>, bem como contribuição no controle de abertura e propagação de fissuras e aumento da ductilidade, permitindo maiores deformações antes da ruptura.

Entretanto, existem algumas questões que, ainda, precisam ser melhor compreendidas, como a influência do teor de fibras e do tamanho das fibras que otimizam a mistura. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da utilização de fibras naturais de coco em argamassas de cimento Portland, por meio da avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas para 3 (três) diferentes teores de fibra.

## **2. FIBRA DE COCO**

### **2.1. Processo de geração do resíduo**

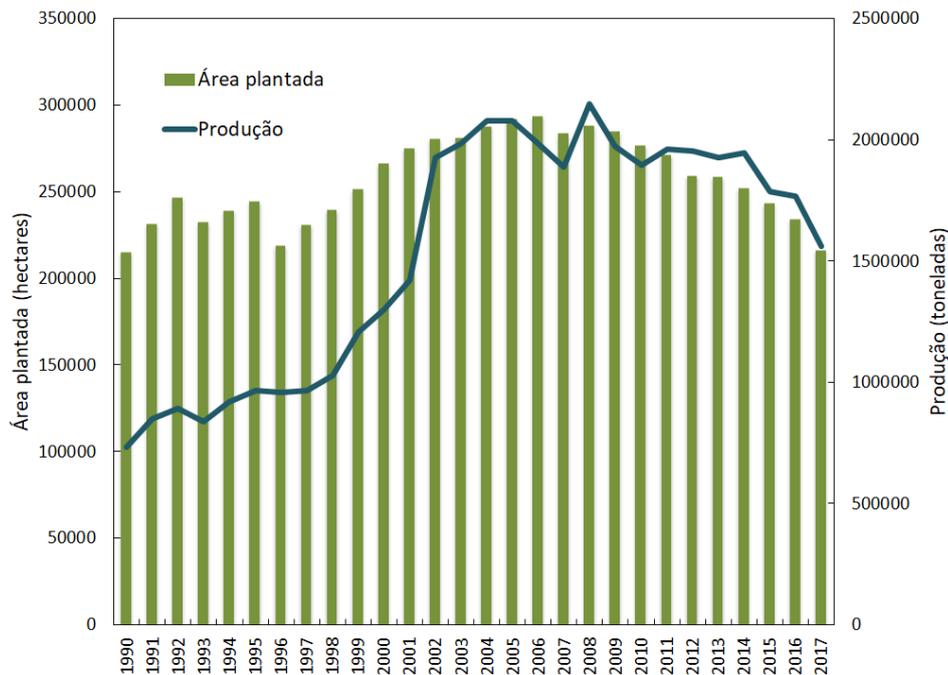
O coqueiro é uma cultura tropical, largamente distribuída na Ásia, África, América Latina e região do Pacífico. É cultivado em aproximadamente 90 países <sup>(11)</sup>. A introdução do coqueiro no Brasil e sua adaptação aos solos arenosos do litoral brasileiro permitiu o surgimento de uma classe agrícola de grande produção e com grande importância social. Há indícios de que o coqueiro foi introduzido no Brasil em meados do século XVI através do estado da Bahia e disseminou-se, inicialmente, por todo o litoral nordestino <sup>(12)</sup>. Posteriormente, acabou se adaptando em outras regiões do Brasil e, o que se constata nos dias atuais, é o cultivo em quase todas as unidades da federação brasileira.

De acordo com o IBGE <sup>(1)</sup>, a produção de coco no Brasil alcançou um total de aproximadamente 1.561.961 toneladas de frutos na safra de 2017 (Figura 1). Apesar da redução na produção, quando comparada a anos anteriores, o total de frutos produzidos ainda representa um grande volume da produção agrícola brasileira. Além disso, sabe-se que o estado do Espírito Santo se enquadra como o 6º maior produtor do Brasil, responsável pela produção de 118.476 toneladas de frutos no ano de 2017<sup>(1)</sup>. Entretanto, a finalidade principal da produção no Brasil é para o consumo da água do coco,



colocando o país diante de um sério problema ambiental: a disposição final dos resíduos gerados neste processo.

Figura 1 – Área plantada e produção de coco no Brasil de 1990 a 2017 <sup>(1)</sup>.



O grande consumo da água do coco, principalmente nas cidades litorâneas, é responsável pela geração de cerca de 6,7 milhões de toneladas de casca/ano <sup>(7)</sup>, transformando-se em um sério problema ambiental. De acordo com Senhoras (2003) <sup>(14)</sup>, cerca de 70% do lixo gerado no litoral de grandes cidades brasileiras é composto por cascas de coco verde. Segundo Silva et al. (2015) <sup>(3)</sup>, aproximadamente 65% do lixo proveniente do consumo da água de coco é encaminhado para lixões ou aterros controlados que, do ponto de vista ambiental, pouco se diferenciam dos lixões convencionais <sup>(5)</sup>. Essas cascas também se tornam foco de proliferação de doenças, além de diminuir a vida útil de aterros sanitários, pois constitui material de difícil degradação, necessitando de cerca de 8 a 12 anos para se decompor <sup>(8)</sup>. Portanto, o Brasil tem uma grande responsabilidade no que diz respeito à destinação adequada através do reaproveitamento em detrimento da simples deposição em aterros.

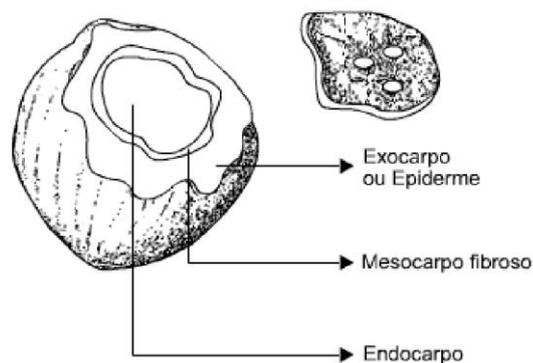
## 2.2. Caracterização do resíduo

O coco é um fruto constituído por quatro partes principais (Figura 2): a epiderme, que consiste em uma camada externa fina e lisa que forma a sua casca; mesocarpo, camada intermediária fibrosa de onde obtém-se a fibra; o endocarpo, uma camada lenhosa e dura; e a castanha (albúmem sólido),



que é a parte do fruto de maior valor comercial, além da água do coco. O fruto chega a alcançar o peso médio de 3 a 4 kg e a quantidade de água diminui à medida que o fruto amadurece <sup>(8)</sup>. A fibra do coco é extraída do mesocarpo. As fibras podem ser extraídas simplesmente embebendo a casca em água para decompor o material macio que envolve as fibras. Alternativamente, um processo mecânico pode ser usado para separar as fibras.

Figura 2 – O coco e suas partes <sup>(15)</sup>.



Em geral, a fibra de coco apresenta 350 mm de comprimento, 0,12 – 0,25 mm de diâmetro e densidade de 1250 kg/m<sup>3</sup>. Quanto a sua composição, essas fibras são formadas basicamente por celulose, hemicelulose, lignina, pectina e minerais. A celulose é o principal constituinte estruturante, responsável pela estabilidade e resistência da fibra. A hemicelulose, por sua vez, funciona como um material ligante entre a celulose e a lignina <sup>(8)</sup>. Este tipo de fibra tem uma das maiores quantidades de lignina, o que a torna mais flexível do que a maioria dos outros tipos de fibras naturais <sup>(16)</sup>. O alto teor de lignina também permite que a degradação da fibra de coco ocorra muito mais lentamente do que outras fibras naturais <sup>(17)</sup>.

Figura 3 – Aspecto superficial da fibra de coco obtida por MEV<sup>(20)</sup>.

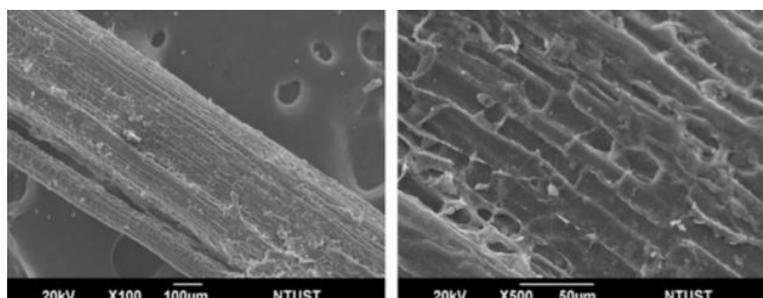
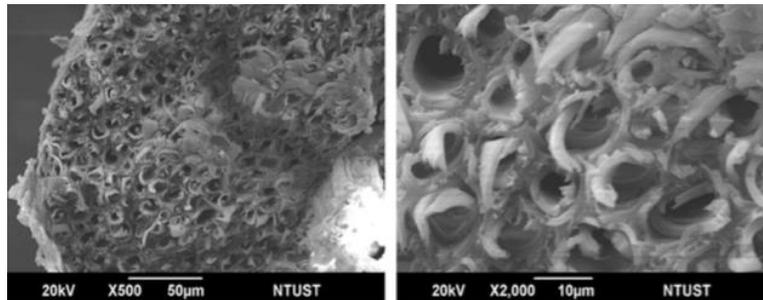




Figura 4 – Seção transversal da fibra de coco obtida por MEV<sup>(20)</sup>.



As Figuras 3 e 4 mostram as características microestruturais das fibras de coco obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estas micrografias evidenciam a superfície rugosa e a estrutura porosa da fibra de coco. A rugosidade superficial da fibra de coco ajuda na adesão da fibra na matriz cimentícia, resultando em melhor resistência mecânica do compósito <sup>(18)</sup>. Em relação às propriedades mecânicas da fibra de coco, de acordo com Ramli et al. (2013) <sup>(19)</sup>, as fibras possuem resistência à tração de aproximadamente 175 MPa e módulo de elasticidade que chega a 22,4 GPa.

### 2.3. Usos potenciais e novos produtos

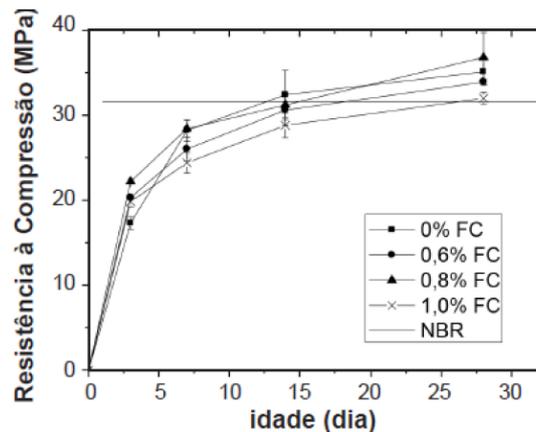
No contexto atual, recicla-se uma pequena parcela da casca do coco que é descartada, principalmente focada na utilização das fibras. Essas fibras são utilizadas para fabricação de tapetes e capachos, fabricação de cordas, utilização na produção de vassouras, como enchimento de almofadas, na fabricação de madeira prensada, dentre outras aplicações <sup>(8)</sup>. Na construção civil, as principais linhas de pesquisa estão focadas no estudo da inclusão de fibras de coco dispersas na matriz cimentícia, para a produção de compósitos de aplicação não estrutural. Argamassas reforçadas com fibras de coco podem ser utilizadas como uma alternativa de material de construção mais sustentável, sendo aplicadas na fabricação de placas de argamassa e painéis de vedação vertical. Além disso, o custo reduzido possibilita a aplicação em habitações de interesse social <sup>(21)</sup>.

Savastano e Pimentel (2000) <sup>(22)</sup> indicam que as fibras de coco aumentam a capacidade de absorção de energia do compósito, em detrimento do colapso instantâneo observado para matrizes cimentícias sem reforço. Em relação ao módulo de elasticidade, há um ganho de desempenho devido à melhor deformabilidade decorrente da presença das fibras na matriz <sup>(22)</sup>. Bonato et al. (2014) <sup>(23)</sup> apresentaram resultados de ensaios de compressão realizados em corpos de prova de



concreto reforçados com 0,6, 0,8 e 1% de fibras de coco (Figura 5). De acordo com o autor, houve melhoria de desempenho quanto à compressão axial para as argamassas reforçadas com 0,8% de fibras de coco, possibilitando redução de até 5% do total de cimento sem decréscimo na resistência à compressão.

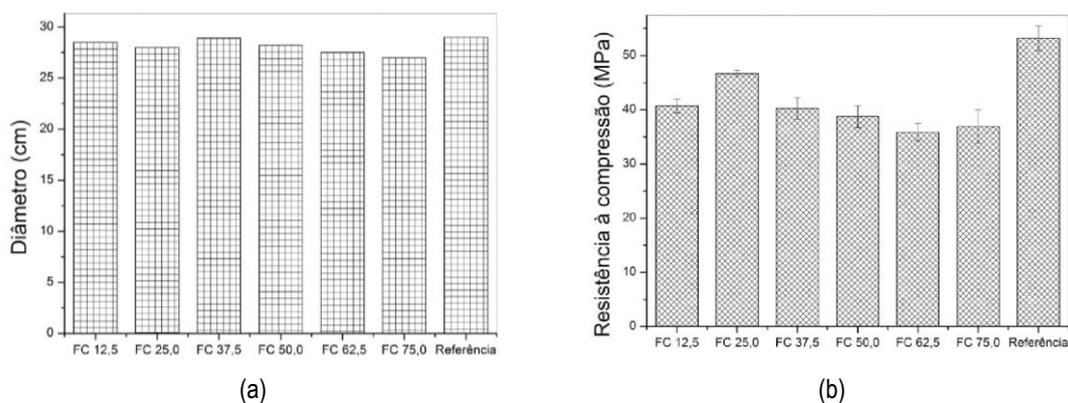
Figura 5 – Resultados de ensaios de compressão realizados em concretos reforçados com 0, 0,6, 0,8 e 1% de fibra de coco<sup>(23)</sup>.



Apesar da melhoria no comportamento mecânico, a presença das fibras de coco pode ser limitada pela redução da consistência da matriz cimentícia. No trabalho de Silva et al. (2014) <sup>(9)</sup>, foi observado que a presença de 0,3% de adição de fibra de coco em uma argamassa de referência, considerando comprimentos de 12,5, 25, 37,5, 50, 62,5 e 75 mm, resultou em redução na consistência da argamassa (Figura 6.a). Para comprimentos de fibras maiores, essa redução ficou ainda mais evidente. Além disso, após realização de ensaios de compressão aos 28 dias, concluiu-se que o uso das fibras de comprimentos maiores que 50 mm resultaram em maiores decréscimos no comportamento mecânico (Figura 6.b). O comprimento de 25 mm foi considerado como sendo o comprimento crítico da fibra de coco para as argamassas estudadas. Essa redução na resistência é atribuída à alta taxa de absorção dessas fibras, o que resulta em uma zona de transição porosa na região do entorno da fibra. Entretanto, de maneira geral a presença de fibras resultou em uma maior ductilidade do material após a fissuração, mantendo as faces rompidas dos corpos de prova unidas, mesmo após atingida a carga máxima.



Figura 6 – Resultados dos (a) ensaios de consistência e (b) ensaios de compressão axial aos 28 dias em argamassas reforçadas com 0,3% de fibra de coco com diferentes comprimentos<sup>(9)</sup>.



Ainda referente à influência das fibras de coco na resistência à compressão, Silva et al. (2012)<sup>(10)</sup> apresentaram resultados de resistência à compressão 7,1% maiores para a argamassa reforçada com fibras de coco de 25 mm de comprimento (dosagem de 2 kg/m<sup>3</sup>), em relação a argamassa de referência sem fibra. Escariz (2008)<sup>(24)</sup> demonstrou ser importante o traço de argamassa para se alcançar eficácia na utilização das fibras de coco. De acordo com a autora, a partir dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, foi possível concluir que, para misturas com matriz de argamassa de traço 1:1, a adição de fibras reduziu a resistência à compressão. Já para o compósito com matriz de traço 1:2, a adição de fibras trouxe aumento na resistência à compressão.

A determinação da resistência à tração na flexão é uma avaliação importante na investigação do uso de fibras, pois é possível avaliar a evidente influência na melhoria da tenacidade e na absorção de esforços de tração da matriz. De acordo com Soares et al. (2012)<sup>(21)</sup>, a presença de 0,25% em volume de fibras de coco com 4 cm de comprimento em uma argamassa resultou em acréscimo de aproximadamente 20% na resistência à tração na flexão em relação a uma argamassa sem reforço. Além disso, foi observado ganho de desempenho da argamassa, em termos de ductilidade e capacidade de resistência após a fissuração dos corpos de prova.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

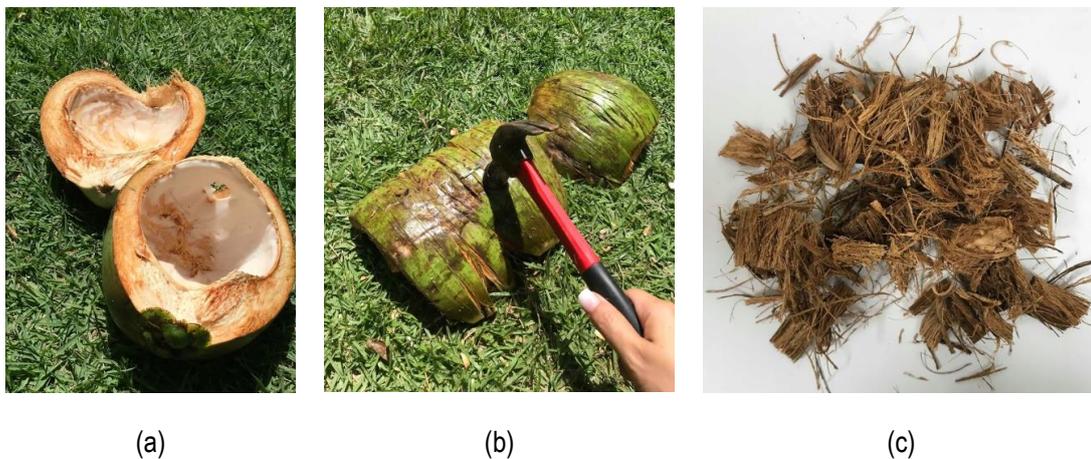
O cimento Portland utilizado para a produção das argamassas foi o CP V ARI, devido a sua maior velocidade de hidratação e menor teor de adições minerais que poderiam influenciar no



desempenho da fibra de coco. Foram utilizadas quatro frações de areia normalizada, que atendem as prescrições da ABNT NBR 7214: 2015 <sup>(25)</sup> areia de fração grossa, média grossa, média fina e fina, correspondendo às peneiras de abertura nominal 1,2, 0,6, 0,3, e 0,15 milímetros (números 16, 30, 50 e 100).

Em relação à obtenção das fibras de coco, o processo de extração foi realizado diretamente no coco (Figura 7). O processo inicial consistiu em manter o coco verde sob incidência solar por 3 dias para redução da umidade presente. A seguir, foi realizada a separação do mesocarpo do coco verde por um processo mecânico, com auxílio do martelo para facilitar a desfibrilação. Após separação das fibras, foi realizado um ciclo de imersão em água em temperatura ambiente e secagem ao ar livre – 1 dia de imersão e 2 dias de secagem, para eliminação das impurezas <sup>(26)</sup>. O procedimento final consistiu no corte manual das fibras com o comprimento pré-determinado de 25 mm, conforme resultados sugeridos no estudo de Silva et al. (2014) <sup>(9)</sup>.

Figura 7 – Processo de extração das fibras de coco: (a) aspecto inicial antes do procedimento; (b) processo mecânico para separação do mesocarpo; (c) aspecto final das fibras com 25 mm de comprimento.



### 3.2. Dosagem e mistura

A dosagem escolhida para avaliação da influência da presença de fibras teve como base o traço recomendado pela ABNT NBR 7215: 1996<sup>(27)</sup> para determinação da resistência à compressão de cimento Portland. A única adaptação foi a relação água/cimento, que teve de ser maior devido à tendência de redução da trabalhabilidade pela absorção de água pelas fibras, sendo selecionada a relação água/cimento de 0,5. Foram adotadas, para este estudo três dosagens de fibras diferentes:



0,3%, 0,6% e 1% em relação ao volume de argamassa. As quantidades de material utilizadas para cada traço são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dosagem da argamassa.

Materiais	Referência	FC0,3	FC0,6	FC1,0
Cimento (g/cm <sup>3</sup> )	0,53	0,53	0,53	0,53
Areia grossa (g/cm <sup>3</sup> )	0,40	0,40	0,40	0,40
Areia média grossa (g/cm <sup>3</sup> )	0,40	0,40	0,40	0,40
Areia média fina (g/cm <sup>3</sup> )	0,40	0,40	0,40	0,40
Areia fina (g/cm <sup>3</sup> )	0,40	0,40	0,40	0,40
Água (g/cm <sup>3</sup> )	0,26	0,26	0,26	0,26
Fibra de coco (%)	-	0,30	0,60	1,00

Para mistura da argamassa, foi utilizada uma argamassadeira de bancada com capacidade de 5 litros. O procedimento de mistura dos insumos seguiu a sequência: i) mistura do cimento com a água por 30 segundos em velocidade baixa; ii) inserção de todas as frações de areia e mistura por mais 30 segundos em velocidade baixa; iii) adição das fibras já previamente saturadas com parte da água do traço, seguido de mistura por mais 30 segundos em velocidade alta. Vale ressaltar que a mistura das fibras já umedecidas garantem uma dispersão mais eficiente na argamassa.

### 3.3. Procedimento experimental

As argamassas especificadas foram avaliadas em relação a sua consistência e desempenho mecânico. A avaliação da consistência de argamassas reforçadas com fibras naturais é de grande importância, pois, em geral, a trabalhabilidade da mistura pode ser significativamente prejudicada com a adição de fibras. Deve-se garantir que a matriz tenha consistência adequada para que a aderência e a transferência de cargas entre a mesma e a fibra sejam garantidas, independente da dosagem de fibra utilizada.

Em relação à consistência no estado fresco, foram obtidos os índices de consistência para cada mistura de acordo com recomendações do anexo B da norma ABNT NBR 7215: 1996<sup>(27)</sup>. Dessa forma, após cada mistura realizou-se o abatimento na mesa de consistência de tal forma que, após a retirada do molde tronco-cônico, foram executadas 30 quedas da mesa em 30 segundos, provocando o abatimento do tronco de cone da argamassa. O índice de consistência, por sua vez, correspondeu ao valor do diâmetro médio obtido a partir de dois diâmetros ortogonais medidos com paquímetro. A Figura 8 apresenta a mesa e o molde utilizados para realização da avaliação de consistência.



Figura 8 – Mesa e molde metálico utilizado para obtenção do índice de consistência das argamassas.



Após os testes de consistência, corpos de prova prismáticos de dimensões de 4 x 4 x 16 cm foram moldados para avaliação mecânica. Para cada dosagem especificada, 6 corpos de prova foram moldadas da mesma mistura, resultando em um total de 24 corpos de prova. O preenchimento das formas seguiu sempre o mesmo padrão: preenchimento até a metade do molde, seguido de 25 golpes, e então preenchimento total seguido de mais 25 golpes e realização do acabamento da superfície com espátula. A Figura 9 apresenta a configuração final após moldagem dos corpos de prova em formas metálicas. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos por filme plástico e desmoldados após 72 horas. O procedimento final de cura consistiu na imersão em água saturada de cal até o momento do ensaio, após 10 dias.

Figura 9 – Resultado final de corpos de prova de argamassa reforçados com fibras de coco moldados em formas metálicas prismáticas.





A avaliação mecânica consistiu na execução de ensaios de flexão para determinação da resistência à tração na flexão, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 13279: 2005<sup>(28)</sup>. Para a determinação da resistência à tração na flexão, o corpo de prova era posicionado no dispositivo de apoio e posteriormente era aplicada a carga até a ruptura na Prensa Universal Amsler de capacidade de carga de 50 toneladas do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC da Universidade Federal do Espírito Santo (Figura 10.a). A resistência à tração na flexão é obtida segundo Equação A, sendo  $R_f$  a resistência à tração na flexão em MPa,  $F_f$  a carga aplicada no centro do vão em Newtons e  $L$  o vão entre os apoios, em milímetros.

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad (A)$$

Posteriormente, para a determinação da resistência à compressão foram utilizadas as metades dos corpos de prova do ensaio de flexão (Figura 10.b) sob carregamento até a ruptura na Prensa Universal Amsler de capacidade de carga de 50 toneladas do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC da Universidade Federal do Espírito Santo. A resistência à compressão é obtida pela Equação B, onde  $R_c$  representa a resistência à compressão em MPa e  $F_c$  a carga máxima aplicada em Newtons e  $A$  a área da seção transversal na qual a carga foi aplicada.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (B)$$

A resistência média será calculada considerando seis corpos de prova ensaiados à tração na flexão e doze corpos de prova ensaiados à compressão.

Figura 10 – Arranjo dos ensaios de (a) flexão em três pontos e (b) compressão nas argamassas.



(a)



(b)



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir do ensaio de consistência para as misturas estão apresentados na Tabela 2. Observa-se que a argamassa de referência (sem fibras) apresentou maior fluidez quando comparada às argamassas com fibra. Isso é explicado devido ao fato de que as fibras podem dificultar a mobilidade das partículas, reduzindo a fluidez do material <sup>(6)</sup>. Além disso, fibras naturais apresentam uma grande absorção de água, o que também pode ser prejudicial à consistência da argamassa <sup>(29)</sup>.

Tabela 2 – Obtenção do índice de consistência das argamassas.

Dosagem	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Índice de consistência (mm)
Referência	211,5	208,0	209,8
FC0,3	204,5	204,0	204,3
FC0,6	182,0	182,0	182,0
FC1,0	154,0	163,0	158,5

A presença de 0,3% de fibras resultou em redução de 2,6% do índice de consistência em relação à argamassa de referência, enquanto as dosagens de 0,6% e 1% resultaram em redução de 13,2% e 24,4%, respectivamente. Apesar disso, em nenhum dos casos foram observados problemas relacionados com a segregação dos materiais do traço ou exsudação de água. O resultado final do espalhamento das argamassas está apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Resultado final do ensaio de consistência para a argamassa (a) referência e reforçada com (b) 0,3%, (c) 0,6% e (d) 1,0% de fibra de coco.



(a)

(b)

(c)

(d)

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de flexão e compressão. Observa-se que o aumento do teor de fibras influenciou positivamente nos valores de resistência para os corpos de prova. Quanto maior a dosagem, maior a resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas. Apesar da redução do índice de consistência da mistura com maiores teores de fibra,



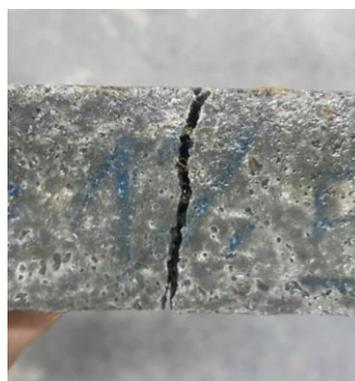
a capacidade resistente da argamassa não foi prejudicada. Isso se deve ao cuidado atribuído ao processo de moldagem e compactação, no qual reduziu o possível aumento de defeitos devido à dificuldade da moldagem com maiores dosagens de fibras. Além disso, considerando o desvio-padrão, quase não há diferença entre os resultados obtidos de resistência mecânica, considerando a tração na flexão e compressão, evidenciando novamente a eficiência na moldagem dos corpos de prova, mesmo com menores índices de consistência.

Tabela 3 – Resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas.

Dosagem	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
Referência	5,82 ± 0,12	32,93 ± 1,93
FC0,3	6,36 ± 0,75	33,35 ± 1,48
FC0,6	7,93 ± 0,43	36,24 ± 3,52
FC1,0	8,12 ± 0,76	37,43 ± 7,44

Em relação ao comportamento observado após a ruptura do corpo de prova verifica-se a ductilidade do compósito pós-fissuração. As fibras mantiveram unidas as faces dos corpos de prova rompidos (Figura 12), evitando sua ruptura brusca, evidenciando a maior capacidade de deformação que a fibra promoveu na argamassa. Isso ocorre devido a ponte de transferência de tensões criada pelas fibras na região da fissura, o que resulta em absorção de carga mesmo após a fissuração da matriz. O mesmo comportamento foi observado por diversos autores <sup>(9,10)</sup>. Assim como o esperado, esse comportamento não foi observado para a argamassa sem reforço, visto que matrizes cimentícias têm como principal característica uma ruptura do tipo frágil.

Figura 12 – Corpos de prova rompidos após ensaio de (a) flexão e (b) compressão nas argamassas reforçadas com fibras de coco.



(a)



(b)



## 5. CONCLUSÕES

As principais conclusões que envolvem a avaliação da viabilidade da utilização da fibra de coco para fins de reforço em argamassas cimentícias, incluem:

- I. A presença de fibras de coco diminuiu a consistência da argamassa, tornando-a menos fluida. Entretanto, a sua mistura e moldagem não foram inviabilizadas, mesmo com dosagens relativamente altas;
- II. Para as dosagens avaliadas, o teor de fibras influenciou na capacidade de carga da argamassa quando submetida a carregamentos de tração na flexão e compressão. Quanto maior o teor de fibras, maiores os valores de resistência em ambos os casos;
- III. O reforço da argamassa com fibras de coco resultou em capacidade de deformação dos corpos de prova mesmo após o aparecimento da primeira fissura, evidenciando uma ruptura menos frágil.

Conclui-se, portanto, que esses resultados apontam para a possibilidade técnica do uso de fibras de coco em argamassa na construção civil. Entretanto, visando sua aplicação, é necessário estudo a respeito da durabilidade dessas fibras, visto que estão susceptíveis à degradação alcalina. Uma possível solução seria a utilização de matrizes com menor alcalinidade, com adição de pozolanas, assim como recomendado anteriormente por alguns autores <sup>(30,31)</sup>.

## 6. REFERÊNCIAS

1. IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - LSPA. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2018.
2. SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL - SÃO PAULO (SINDUSCON - SP). Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil - Avanços Institucionais e melhorias técnicas. Agosto, 2015.
3. SILVA, E.; MARQUES, M.; JUNIOR, C.; VELASCO, F. Análise técnica para o reaproveitamento da fibra de coco na construção civil Technical. **Ambiência Guarapuava**, v. 11, n. 3, p. 669–683, 2015.
4. JOHN, V.; ÂNGULO, S. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. **Coletânea Habitare**, v. 4, p. 8–71, 2003.
5. NAKATA, R.; LIMA, J. Potencial da aplicação de fibras de coco em matriz à base de Cimento Portland. **Anais da Mostra e Pesquisa em Ciência e Tecnologia**, 2017.
6. BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2 ed. Taylor & Francis, 2007.



7. BITENCOURT, D.; PEDROTTI, A. Usos da Casca de Coco: Estudo das Viabilidades de Implantação de Usina de Beneficiamento de Fibra de Coco em Sergipe. **Revista da Fapese**, v. 4, n. 2, p. 113–122, 2008.
8. CASTILHOS, L. Aproveitamento da fibra de coco. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**. Instituto de Tecnologia do Paraná, 2011.
9. SILVA, E.; SILVA, P.; MARQUES, M.; JUNIOR, C.; GARCIA, F.; LUZARDO, F. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2005, p. 1268–1273, 2014.
10. SILVA, E.; MARQUES, M.; JUNIOR, C. F. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1555–1561, 2012.
11. BRAINER, M. Produção de coco: o nordeste é destaque nacional. **Caderno Setorial ETENE**, ano 3, nº 61, 2018.
12. SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBÁ, E. A. Introdução do coqueiro no Brasil: Importância histórica e agrônômica. **Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos 47**, v. 47, p. 24, 2002.
13. MARTINS, C. R.; JESUS, L. A. de. Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: Panorama 2014. **Comitê Local de Publicações da Embrapa Tabuleiros Costeiros**, v. 1, n. 1, p. 53, 2014.
14. SENHORAS, E. Estratégia de uma Agenda para a Cadeia Agroindustrial do Coco. Campinas, Ed. ESC, 2003.
15. SOUZA, E.; BRITO, R.; CAMPOS, N.; RAMOS, D. Aplicação da fibra de coco no processo de isolamento termo acústico. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 233-245, 2015.
16. LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 664–669, 2015.
17. HEJAZI, S.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 100–116, 2012.
18. MONTEIRO, S.; TERRONES, L.; CARVALHO, E.; D'ALMEIDA, J. Efeito da interface fibra/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco. **Revista Matéria**, v. 11, n. 4, p. 395–402, 2006.
19. RAMLI, M.; KWAN, W.; ABAS, N. Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 554–566, 2013.
20. CLARAMUNT, J.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; VENTURA, H.; ARDANUY, M. Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 230–239, 2016.
21. SOARES, E.; CANGUSSÚ, C.; PARENTE, E.; GONÇALVES, P.; CABRAL, A. Determinação de propriedades mecânicas e físicas de argamassa forçada com fibras de coco e sisal. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, n. 1, p. 3965–



- 3971, 2012.
22. SAVASTANO, H.; PIMENTEL, L. Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 103–110, 2000.
  23. BONATO, M.; BRAGANÇA, M.; PORTELLA, K.; VIEIRA, M.; BRONHOLO, J.; SANTOS, J.; CERQUEIRA, D. Argamassas fotocatalíticas e concretos com adição de fibras de coco e sisal para a redução de impactos ambientais de gases poluentes. **Cerâmica**, v. 60, p. 537–545, 2014.
  24. ESCARIZ, R. **Desempenho à compressão de compósitos reforçados por fibras de coco**. Trabalho de conclusão de curso. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2008.
  25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 2015.
  26. BARBOSA, R.; SOUZA, G.; SILVA, V.; GONÇALVES, E. Extração de fibras de coco para aplicação em materiais de engenharia. **Educação e ciência para a cidadania global**, Vale do Paraíba, p. 1–6, 2018.
  27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
  28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
  29. JOHNSTON, C. D. **Fiber-Reinforced Cements and Concretes**. 3 ed. Taylor & Francis, 2010.
  30. TOLEDO FILHO, R.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G.; GHAVAMI, K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 127-143, 2000.
  31. CASTOLDI, R.; SOUZA, L.; SILVA, F. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Constructions and Building Materials**, v. 211, p. 617-628, 2019.



## RCD COMO AGREGADO RECICLADO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL

**Bárbara Konzen** <sup>(1)</sup>; **Flavio Hara** <sup>(2)</sup>; **Sofia A. L. Bessa** <sup>(3)</sup>

Universidade Federal de Minas Gerais - (1) barbaradvk@gmail.com; (2) fhara@dee.ufmg.br; (3) sofiabessa@ufmg.br.

### RESUMO

O setor da construção civil brasileiro é responsável por grande parte dos resíduos sólidos urbanos produzidos anualmente, como também é o setor com maior capacidade de incorporação dos resíduos gerados nas cidades, especialmente os resíduos de construção e demolição (RCD). Na questão da reciclagem, seu uso como agregado já vem sendo implementado desde a década de 1990. Dessa forma, este artigo pretendeu realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação dos RCD Classe A na produção de concretos com o objetivo de se entender a abrangência das pesquisas realizadas na última década. Foram selecionados artigos publicados em periódicos e em eventos científicos da área, disponíveis online ou impressos, que apresentassem estudos de caso de aplicação de RCD como agregado em concretos. A revisão bibliográfica apresentou casos em todas as cinco regiões do Brasil, o que permitiu concluir o relevante desenvolvimento das pesquisas em âmbito nacional. Porém, ainda há uma lacuna referente aos temas relativos à durabilidade dos concretos com RCD. Pode-se perceber, também, que por mais que os RCD apresentem boas propriedades físicas, sejam mais econômicos e disponíveis em grande volume próximo às zonas de demanda, seu uso ainda não é difundido de modo relevante a mitigar ou amenizar o impacto ambiental causado pelo setor. Além disso, notou-se a carência de estudos que abordem as questões de durabilidade e de desempenho dos sistemas construtivos produzidos com o RCD.

**Palavras-chave:** construção civil, reciclagem, resíduos de construção e demolição.

## CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE AS RECYCLED AGGREGATE: A LITERATURE REVIEW OF STUDIES DEVELOPED IN BRAZIL

### ABSTRACT

The Brazilian construction industry is responsible for a large part of urban waste produced annually, and it is also the sector with greatest capacity to incorporate this waste generated in cities, especially the construction and demolition waste (CDW). In matter of CDW recycling, its use as an aggregate is an alternative that has been implemented since the 90's decade. Because of that, this article presents a literature review which investigated the possibilities of Class A CDW reuse for concrete production with the aim of understanding the scope of the researches realized in the last decade. Were selected articles published in journals and scientific events, available online or in print, presenting case studies of CDW application as concrete aggregate. The literature review presented cases in all five Brazil's regions, which allowed us to conclude the relevant research development at a national level. However, there is still a lack of research related to the durability of the concrete using CDW as an aggregate. Finally, it may be seen that, even when CDW shows good physical properties, are economic and available in enough volume, close to demand areas, its use is not yet widespread enough to mitigate the environmental impact caused by the construction industry. In



addition, there was a lack of studies addressing the durability and performance issues of the building systems produced with the CDW.

**Key-words:** construction, recycling, construction and demolition waste.

## INTRODUÇÃO

A fim de ratificar os termos a serem apropriados neste artigo, vale-se discorrer brevemente acerca das diferenças das siglas RCC (Resíduos de Construção Civil) e RCD (Resíduos de Construção e Demolição).

Ainda que o termo “Resíduos de Construção e Demolição” seja o mais abrangente e empregado na área atualmente, é preciso ressaltar que o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em suas resoluções em que estabelece “diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil” <sup>(1)</sup> (p. 571), refere-se aos RCC ao apresentar as informações.

Considerando-se essa divergência em se definir a qual termo mais se apropria este trabalho, a revisão bibliográfica englobará estudos que abordam ambos. Sendo assim, neste trabalho, apropria-se da sigla RCD para referir aos resíduos oriundos do setor da construção civil e ações de demolição, simultaneamente.

A construção civil é uma atividade de extrema importância para o desenvolvimento econômico e social, porém, é responsável por grande parte dos impactos ambientais através do excessivo consumo de recursos naturais que geram produtos, subprodutos e resíduos. Estimativas sugerem que entre 20% a 50% dos recursos naturais consumidos estão relacionados à atividade de construção civil <sup>(2, 3)</sup>, e que esta é “responsável por 40% dos resíduos gerados na economia”, fazendo do setor a atividade humana de maior impacto ambiental <sup>(2)</sup>.

Estudos sugerem que o crescimento de um país é acompanhado proporcionalmente pela indústria da construção, e que para um desenvolvimento sustentável, o desenvolvimento econômico deverá ser desvinculado da geração de impactos ambientais. Ademais, Brasileiro e Matos <sup>(2)</sup> defendem que para diminuir o impacto ambiental, devido tanto a exploração de recursos naturais quanto o descarte após sua cadeia produtiva, deve-se agregar maior valor econômico aos RCD, por meio da reciclagem destes resíduos e, em consequência, promover a reversão do atual cenário nacional quanto ao seu descarte.

No Brasil são gerados em média de 500 kg/hab.ano de entulho <sup>(4)</sup>. Brasileiro e Matos <sup>(2)</sup> concluíram que a maioria dos RCD no Brasil não são reciclados, por isso, consideram que “[...] todos os



agentes envolvidos na fabricação, distribuição, venda e consumo são responsáveis pelos seus resíduos[...]” (p.179), e assim, sugerem que a reciclagem deverá fazer parte da rotina, na forma de mudança de paradigma na conscientização das pessoas no futuro. Ratificam a viabilidade dos RCD “[...] quando o custo de deposição em aterro exceder o custo de transporte para o centro de reciclagem e o custo de utilização do agregado primário exceder o custo do agregado reciclado [...]” (2). Além disso, o desenvolvimento e o aprimoramento de normativas e leis vêm demonstrando uma preocupação política pela responsabilidade pelo impacto ambiental.

Considerando-se que os resíduos dessa natureza [construção civil] representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas e que a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental, os Municípios são os responsáveis pela gestão e destinação ambientalmente correta de tais resíduos, buscando a efetiva redução dos impactos ambientais. (2)

Notadamente, a reciclagem de RCD e o seu reaproveitamento no próprio setor da construção civil como matéria-prima não-convencional têm sido impulsionados no meio acadêmico graças ao desenvolvimento de pesquisas acerca do tema, o que é justificado pelos benefícios que esta atividade proporciona, sejam econômicos, ao se reduzir os custos de gerenciamento de resíduos e de aquisição de matéria-prima, ou ambientais, ao se reduzir o volume de resíduo descartado.

A construção civil é um dos setores que apresenta maior potencial para absorver os resíduos sólidos.[...] Dentre as várias possibilidades, a reciclagem de RCD pode ser aplicada para diversos fins, tais como: camadas de base e sub-base para pavimentação, coberturas primárias de vias, fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, fabricação de concretos, fabricação de pré-moldados (blocos, meio-fio, dentre outros), camadas drenantes, etc.(2)

Ao passar pelo processo de moagem, o entulho pode ser utilizado em diversas implementações no setor da construção civil, dependendo de sua granulometria, com agregados: graúdos, médios ou miúdos. Sendo assim, vale-se dessa versatilidade do material ao retornar ao setor que foi produzido primeiramente.

## **1. GERAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RCD**

Segundo Brasileiro e Matos (2), até 2002, quando entrou em vigor a Resolução CONAMA 307 de 2002 (1), não havia políticas públicas para os resíduos oriundos da construção civil no Brasil. Posterior a isso, a Resolução 348 de 2004 (5) e a Resolução 448 de 2012 (6) propõem algumas alterações atualizando às orientações acerca do tema.

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (7) orienta sobre as possibilidades de disposição de resíduos, porém, incentivando à reciclagem e a



sustentabilidade ambiental destacando princípios de responsabilidade compartilhada aos diferentes agentes <sup>(8)</sup>.

[...] Desta forma, é necessário, com urgência, não mais apenas a implantação de leis para uma efetiva redução deste resíduo; mas uma efetiva execução destas medidas, para que não se tenha apenas no papel e sim no cotidiano, de cada brasileiro, essa realidade. De forma que possamos ver, um inimigo, o resíduo da construção e demolição, tornar-se um aliado. <sup>(2)</sup>

Para Brasileiro e Matos<sup>(2)</sup>, as leis e suas resoluções já implementadas representam uma efetiva preocupação política com a gestão de resíduos, e por uma visão positivista, já são um primeiro passo rumo à sustentabilidade ambiental.

Todos os autores pesquisados tratam principalmente do aproveitamento dos RCD como agregados e apresentam estudos que tratam destas alternativas. Defendem os RCD como agregado reciclado de ótima qualidade para: “confecção de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas, argamassa de revestimento, camadas de base e sub-base, pavimentos, entre outros.” <sup>(2)</sup> (p.179)

Na Resolução CONAMA 307, de 2002 <sup>(1)</sup> e posterior retificação dada pela Resolução CONAMA 348 de 2004 <sup>(5)</sup>, classifica os RCC em Classes A, B, C ou D conforme a sua origem. Pela norma técnica ABNT NBR 15114:2004 <sup>(9)</sup> também é possível classificar e especificar quais são considerados RCD do tipo A, passíveis de serem utilizados como agregados.

Sendo assim, este artigo restringe-se a uma revisão bibliográfica de alternativas de reciclagem de resíduos do tipo Classe A como agregados para novos materiais.

Segundo Lamberts <sup>(10)</sup> (2018), os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia mundial, e a indústria da construção é responsável por 50% das emissões de CO<sub>2</sub>. Em adição a isso, 40% dos resíduos recebidos diariamente nos equipamentos públicos são oriundos da construção civil <sup>(11)</sup> (p.19).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2017 <sup>(12)</sup>, dos resíduos coletados diariamente em 2016, 63,25% são representados pelos RCD, a geração total de RSU por ano aumentou 1% de 2016 para 2017 e a geração de RSU per capita aumentou 0,48% quando medida em quilos por habitante por dia.

A ABRELPE <sup>(12)</sup> apresentou o quanto as regiões do país influenciam na porcentagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados por dia, confirmando a região sudeste como a maior geradora de resíduos.



É importante ressaltar algumas considerações acerca do impacto ambiental causado por essas etapas de reciclagem. Por exemplo, é possível que toda essa transformação de material, gere tantas emissões, que acabe por causar impacto ambiental muito maior que o descarte.

Brasileiro e Matos<sup>(2)</sup> fazem uma ressalva de que o armazenamento e uso do RCD, ou mesmo algum material que possa estar agregado a ele, pode vir a causar algum impacto ambiental e que isso deve ser analisado antes de sua implementação. Destacam-se os ensaios de lixiviação e de solubilização<sup>(13, 14, 15)</sup> como ações que fornecem resultados sobre o comportamento dos resíduos, indicando quais substâncias podem vir a ser liberadas, como contaminantes, por exemplo.

Além desses ensaios, outra análise importante em relação a questão ambiental é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), orientada pela NBR ISO 14040<sup>(16)</sup>. A ACV é uma estratégia de avaliação de impacto que apresenta resultados quantitativos permitindo a comparação da degradação causada pelos materiais, sistemas e projetos. A partir de ACV do RCD e dos materiais que o compõem e, portanto, a importância de se implementar a rastreabilidade desses materiais, tornará possível quantificar o seu real impacto ambiental.

## **2. MÉTODO**

Este artigo buscou desenvolver uma revisão bibliográfica sobre o uso do RCD Classe A como agregado na produção de produtos para a construção civil, visando uma compilação dos estudos desenvolvidos no país. O embasamento se deu a partir de informações de classificação de resíduos, normativas vigentes e índices de reciclagem no Brasil. Para a fundamentação do escopo da revisão bibliográfica, a pesquisa se restringiu aos últimos 10 anos (2008-2018), buscando artigos publicados no período, online ou impressos, e por palavras-chave ("resíduo de construção e demolição" e "agregado de concreto") no Portal de Periódicos CAPES, como base de dados.

### **3.1. Estudos desenvolvidos no Brasil**

Contreras et al. <sup>(17)</sup> apresentaram estudos para a utilização de resíduo de construção como agregado natural para produção de tijolos, em específico para a região metropolitana de São Paulo. Destacaram a existência da demanda por diversificação das aplicações industriais dos RCD no Brasil. Além disso, apresentam dados de que os RCD possuem ampla gama de porosidade e tamanho de partículas. O estudo utilizou cal e cimento Portland como aditivos e os resultados mostraram que é possível produzir tijolos de baixo custo e excelentes propriedades físicas com RCD como agregado.



Contreras et al. <sup>(17)</sup> analisaram duas amostras de RCD, a primeira coletada diretamente do canteiro de obras por contêineres, e a segunda coletada de uma usina de reciclagem de RCD. A partir dessa coleta, as amostras foram peneiradas, utilizando-se apenas a fração de dimensão menor que 4,8mm. Os autores <sup>(17)</sup> destacaram que é importante considerar o fato de que o agregado natural normalmente é extraído de sítios distantes dos centros urbanos onde estão localizadas as obras, o que influencia diretamente na redução de custo da obra por não demandar extração de matéria-prima natural. Em segundo lugar, representa a otimização de recursos naturais e sua preservação, além de reduzir o gasto de recursos com tratamento de resíduos. E em adição a isso, reduz as áreas poluídas e a propagação de doenças por contaminação e disseminação de insetos e pragas atraídos pelo lixo depositado junto aos RCD. E ainda, outro resultado econômico positivo apontado pelos autores seria de que a administração municipal economizaria recursos financeiros para investir em outras demandas como por exemplo saúde e educação.

Andrade et al. <sup>(18)</sup> compararam as propriedades mecânicas e os índices de carbonatação de argamassas com dois tipos diferentes de agregados reciclados: agregado reciclado de cerâmica e agregado reciclado misto. Os resultados mostraram que quanto maiores porções de agregado reciclado, menor resistência a compressão das argamassas e maior índices de carbonatação independente da idade da amostra. Além disso, a força de conexão/ligação/engaste [*bond strength*] da argamassa com agregado reciclado de cerâmica foi maior do que da argamassa que utilizou o agregado natural de referência.

Bessa, Mello e Belo <sup>(19)</sup> apresentaram uma análise comparativa entre o desempenho mecânico e a durabilidade de blocos de solo-cimento com RCD incorporado, analisando sua viabilidade em paredes sem função estrutural. A comparação foi fundamentada por um tipo sem RCD e outro com 45% da massa total em RCD, em substituição a areia média. Os resultados demonstraram que o material está apto ao uso proposto, no caso, blocos de solo-cimento para paredes monolíticas não estruturais.

De modo geral, os autores utilizaram do RCD como agregado sem especificações (graúdo e miúdo) para a produção de: argamassas <sup>(18, 20, 21)</sup>, concreto <sup>(22, 23, 24, 25, 26)</sup>, concreto de alto desempenho <sup>(3)</sup>, bloco de concreto sem função estrutural <sup>(27)</sup>, bloco de concreto permeável para pavimentação <sup>(28)</sup>, blocos de argamassa<sup>(29)</sup>, bloco de alvenaria sem função estrutural <sup>(30)</sup> e solo-cimento <sup>(31)</sup>.

Algumas pesquisas analisaram a utilização do RCD como agregado miúdo, para produção de: concreto<sup>(4, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38)</sup>, argamassas<sup>(39, 40, 41, 42)</sup> e tijolos <sup>(14)</sup>. Ou ainda como agregado graúdo para produção de: concreto <sup>(43, 44, 45, 46)</sup> e concreto autoadensável <sup>(47)</sup>.



Alguns estudos mais específicos demonstraram a utilização do RCD como areia para a produção de blocos de solo-cimento <sup>(19, 48)</sup>, concreto <sup>(49, 50)</sup> e contrapiso <sup>(51)</sup>; demonstraram, também, a utilização do RCD para substituir a madeira em compósito cimento-madeira <sup>(52)</sup>; além do RCD para substituir o cimento para a produção de concreto <sup>(53)</sup> e o cimento fino para argamassa autoadensável <sup>(54)</sup>.

Além de proporcionar uma visão mais estendida das produções que utilizam o RCD como agregado de concreto no país, foi possível quantificar a produção por região do país. Dos 40 estudos que englobaram esta revisão, 14 foram desenvolvidos na região sul do país, 12 na região sudeste, 10 na região nordeste, 3 no norte e 1 no centro-oeste.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A revisão bibliográfica permitiu concluir que cada uma das cinco regiões do país apresenta pelo menos um estudo recente (desde 2010) na área, o que torna possível aferir a relevância do tema no país nos últimos anos. Além disso, a maioria das análises apresentou resultados positivos quanto a usabilidade dos RCD como material substituto aos agregados em concretos.

Sendo assim, a análise permitiu concluir que por mais que os RCD apresentem boas propriedades físicas, sejam mais baratos e disponíveis em grande volume próximo às zonas de demanda, seu uso ainda não é difundido o suficiente. O grande entrave para a utilização do RCD é cultural, devido a falta de confiança da comunidade, tanto formada pelos profissionais que atuam na construção civil, como pelos consumidores e clientes do setor.

Ainda cabe adicionar a identificação de uma demanda alinhada a esta linha de pesquisa, quando se considera a importância da rastreabilidade dos componentes. Além disso, notou-se a carência de estudos que abordem as questões de durabilidade e de desempenho dos sistemas construtivos produzidos com o RCD.

#### **5. REFERÊNCIAS**

1. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **RESOLUÇÃO CONAMA nº 307 de 2002**. p. 571-574. Publicada no DOU no 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/\\_arquivos/36\\_0910200803050\\_4.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_0910200803050_4.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2018.
2. BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 178-189, 2015.



3. TAVARES, M. E. N. et al. **Estudo comparativo das Propriedades de concretos produzidos com agregados miúdos e grãos reciclados de RCD**. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.68.
4. WATANABE, G. D. B. M. et al. **Avaliação do comportamento mecânico de concretos produzidos com agregados miúdo e reciclado de cerâmica vermelha, com substituição de 0%, 50% e 100%**. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.143.
5. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **RESOLUÇÃO CONAMA nº 348 de 2004**. Disponível em: <[http://gestaoderesiduos.ufsc.br/files/2014/08/Conama\\_348\\_2004\\_Altera\\_307\\_Perigosos.pdf](http://gestaoderesiduos.ufsc.br/files/2014/08/Conama_348_2004_Altera_307_Perigosos.pdf)>. Acesso em 30 nov. 2018.
6. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **RESOLUÇÃO CONAMA nº 448 de 2012**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=116060>>. Acesso em: 30 nov. 2018.
7. BRASIL. **Lei nº 12.305, de 5 de agosto de 2010**: Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm). Acesso em 30 nov. 2018.
8. BRASILEIRO, L. L. **Utilização de Agregados Reciclados provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural no Concreto Asfáltico**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, Piauí. 22 abr. 2013.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114:2004**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. 10p.
10. LAMBERTS, Roberto. **Eficiência Energética em Edificações**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.
11. SINDUSCON-MG; SENAI-MG. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil**. 2.ed. Comissão de Meio Ambiente do SINDUSCON-MG e Parceiros. Belo Horizonte, nov. 2005. 68p.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. 2017. Edição Especial 15 anos. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>. Acesso em: 3 dez. 2018.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. 2004. 71p.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado e resíduos sólidos. 2004. 16p.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2004. 3p.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. nov. 2001. 10p.
17. CONTRERAS, M. et al. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**. p. 594-600. 2016. Disponível em: [https://ac-els-cdn.ez27.periodicos.capes.gov.br/S0950061816311448/1-s2.0-S0950061816311448-main.pdf?\\_tid=53a42498-4193-4742-a24a-94cead4e36f9&acdnat=1539979051\\_557cb89261b8a81db62239aa7daad96b](https://ac-els-cdn.ez27.periodicos.capes.gov.br/S0950061816311448/1-s2.0-S0950061816311448-main.pdf?_tid=53a42498-4193-4742-a24a-94cead4e36f9&acdnat=1539979051_557cb89261b8a81db62239aa7daad96b). Acesso em: 19 out. 2018.
18. ANDRADE, Jairo José de Oliveira et al. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, 161, p.70-83, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817322985>. Acesso em: 5 dez. 2018.



19. BESSA, S.; MELLO, T.; BELO, B. Análises de durabilidade de blocos de solo-cimento com resíduos incorporados. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** 2018, p.2724-2733. Disponível em: [https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrvjvyHGNPPSwQME\\_1-79EZLZIf470U8sIE8SJS6BQSRp5kv-oHk](https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrvjvyHGNPPSwQME_1-79EZLZIf470U8sIE8SJS6BQSRp5kv-oHk). Acesso em: 5 dez. 2018.
20. GIRARDI, A. C. C. et al. **Análise comparativa de parâmetros de argamassas produzidas com agregado reciclado de RCD misto e cimentício.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.86-100.
21. JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: Características físicas e propriedades da microestrutura.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.
22. POLISSENI, G. C. et al. **Dosagem científica de concreto com agregado de resíduo de concreto.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.606-620.
23. SILVA, P. R. et al. **Análise da influência do empacotamento de partículas e distribuição granulométrica quanto à resistência à compressão e consumo de cimento em concretos convencionais.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.288.
24. NIZA, D. A.; ANGULO, S. C. **Concreto seco com agregados reciclados: controle de volume durante a compactação.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.827-842.
25. LEAL, K. D. B. et al. **Estudo da resistência de concretos produzidos pela substituição de agregados naturais por resíduos de concreto.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.180.
26. COELHO, F. C. A. et al. **Influência da substituição de cimento Portland por resíduo moído de blocos cerâmicos na resistência mecânica do concreto auto-adensável.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.85.
27. BARBOSA, L. A. G. et al. **Utilização de resíduos de construção civil em blocos de concreto sem função estrutural.** In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.178
28. JUNG, J. et al. **O uso de resíduos em blocos de concreto permeável para pavimentação.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.292-307.
29. PAULA, P. R. F. et al. **Análise comparativa da resistência à compressão de blocos de argamassa de resíduos de construção e demolição e blocos de argamassa com agregados naturais na cidade de Petrolina.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.158.
30. BARBOSA, A. H. et al. **Utilização de RCD para a produção de blocos de alvenaria sem função estrutural.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.166.
31. CAMICIA, R. et al. **Avaliação da resistência mecânica à compressão simples de diferentes tratamentos do solo-cimento com resíduos de construção e demolição.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.259.
32. SANTANA, V. M.; LEITE. **Avaliação do uso de agregados miúdos reciclados na dosagem e produção de concretos reciclados.** In: Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2018, Foz do Iguaçu. 2018, p.2818-2825. Disponível em: [https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrvjvyHGNPPSwQME\\_1-79EZLZIf470U8sIE8SJS6BQSRp5kv-oHk](https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrvjvyHGNPPSwQME_1-79EZLZIf470U8sIE8SJS6BQSRp5kv-oHk). Acesso em: 5 dez. 2018.
33. KALIL, R. M. L. et al. **Inovação tecnológica e sustentabilidade em habitação social no sul do Brasil.** In: Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2018, Foz do



- Iguaçu. 2018, p.4151-4157. Disponível em: <[https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrjvyHGNNPPSwQME\\_1-79EZLZlf470U8slE8SJS6BQSRp5kv-oHk](https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrjvyHGNNPPSwQME_1-79EZLZlf470U8slE8SJS6BQSRp5kv-oHk)>. Acesso em: 5 dez. 2018.
34. SILVA, A. A. S. et al. **Avaliação das propriedades de concretos contendo resíduos de construção gerados na região metropolitana de fortaleza.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.333-347.
  35. STRAPASSON et al. **Reaproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição na Substituição do Agregado miúdo no Concreto Convencional.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.360-372.
  36. MEDEIROS, M. H. et al. **Respostas mecânicas de concretos com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.725-734.
  37. NAKAMURA, E. S. et al. **Estudo da viabilidade técnica da substituição do agregado miúdo natural por resíduo de construção e demolição em concretos estruturais.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.185.
  38. BOLDO, G. C. et al. **Emprego do pó de pedra em substituição parcial e total ao agregado miúdo na confecção de concreto: avaliação da resistência à compressão através da análise de variância (ANOVA).**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.302.
  39. MAZZOCHINI, M. J; NIEMCZEWSKI, J. A. L. **Análise da viabilidade técnica para o uso de agregados miúdos reciclados em argamassa.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.13-25.
  40. COLIANTE, J. G. R. et al. **Caracterização de argamassa confeccionadas com resíduo de material cerâmico.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.272.
  41. GOMES, P. C. C. et al. **Propriedades mecânicas de diferentes argamassas com resíduos de construção.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.274.
  42. GOMES, P. et al. **Propriedades de argamassa produzidas em obra com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de construção.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.279.
  43. KLAUS, A. G. et al. **reaproveitamento do resíduo de construção e demolição (RCD) na substituição parcial e total do agregado graúdo em concreto convencional.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.348-359.
  44. LEITE, M. B. et al. **Avaliação de concretos com substituição parcial do agregado graúdo por agregado graúdo reciclado de concreto.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.448-462.
  45. SILVA, N. V. et al. **Agregados graúdos e suas implicações na ecoeficiência dos concretos.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.843-857.
  46. FERREIRA, T. et al. **Concreto ecológico: O uso de agregados reciclados para concretos na região metropolitana de Belém e Altamira.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.175.
  47. SILVA, W. G. et al. **Avaliação comparativa de concreto auto-adensável produzido com agregado basáltico e com agregado reciclado de telha para produção de painéis.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.211.
  48. LIMA S. A. et al. **Análise da viabilidade do uso do RCD na produção de blocos de solo-cimento.** In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, 2015, Lisboa. 2015. p.1-7.



49. SILVA, J. K. F. et al. **Resistência mecânica de concretos produzidos com a incorporação de resíduos cerâmicos quando submetidos ao ataque por sulfatos.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.137-151.
50. SANTOS, W. et al. **Concreto com Agregados Reciclados.** In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.52.
51. MIRANDA, L. F. R. et al. **Avaliação de procedimento para execução de contrapisos com areias recicladas produzidas em canteiro de obras.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.735-751.
52. ROCHA, T. M. S. et al. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de compósitos cimento-madeira, produzidos com resíduos de madeira de construção.** In: Anais do 5º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2017, Fortaleza. 2017. p.682-695.
53. BARBOSA, A. H. et al. **Substituição do cimento por resíduo cerâmico em concretos.**In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis. 2011. p.167.
54. FORTUNATO, M. **Estudo da substituição de cimento Portland pelo fino de britagem em argamassa autoadensável.** In: Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2018, Foz do Iguaçu. 2018, p.145-153. Disponível em: [https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrjvyHGNPPSwQME\\_1-79EZLZIf470U8slE8SJS6BQSRp5kv-oHk](https://www.antac.org.br/anais-c1pyf?fbclid=IwAR3925hWrjvyHGNPPSwQME_1-79EZLZIf470U8slE8SJS6BQSRp5kv-oHk). Acesso em: 5 dez. 2018.



## CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE GESSO DE DEMOLIÇÃO DO MUNICÍPIO DE TUCURUÍ-PA

Ângela Maria Almeida Costa <sup>(1)</sup>; Ruthe Noemia Corrêa dos Reis <sup>(2)</sup>;  
Grazielle Tigre de Souza <sup>(3)</sup>

(1) Universidade Federal do Pará (UFPA) – angelacosta82@outlook.com; (2) UFPA-  
ruthethe40@hotmail.com; (3) UFPA – grazielle\_tigre@hotmail.com.

### RESUMO

Os resíduos de obras ainda são vistos como grandes ameaçadores do meio ambiente. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal a busca pelo aproveitamento do resíduo da construção civil da cidade de Tucuruí-Pa, especificamente o resíduo de demolição de elementos de gesso, para tanto, buscou-se avaliar as características deste material e seu potencial reciclável. Para a presente pesquisa realizou-se a coleta de resíduos de placa de forro de gesso e posterior separação e beneficiamento deste material. Após o processo de recalcinação desenvolveu-se a caracterização do material quanto às propriedades físicas (granulometria e massa unitária) e propriedades químicas (água livre, água de cristalização, teor de óxido de cálcio e de anidrido sulfúrico) do gesso em forma de pó. Realizou-se ainda a análise das propriedades físicas da pasta (consistência normal e tempo de pega) e das propriedades mecânicas (dureza superficial e resistência à compressão) no estado endurecido. Os resultados obtidos atenderam em grande parte no que previa as normatizações, possibilitando avaliar de maneira positiva o material. Diante do exposto, certificou-se a viabilidade da reciclagem do gesso oriundos de demolições, sendo que, o material atende o que preconiza as Normas vigentes e pode ser reutilizado nas suas diversas aplicações na construção civil.

**Palavras-chave:** resíduo, impacto ambiental, caracterização.

## CHARACTERIZATION OF THE DEMOLITION PLASTER WASTE OF THE MUNICIPALITY OF TUCURUÍ-PA

### ABSTRACT

Work waste is still seen as a major threat to the environment. In this context, this work has as main objective the search for the use of the waste from the civil construction of the city of Tucuruí-Pa, specifically the residue of demolition of gypsum elements, for this purpose, it was sought to evaluate the characteristics of this material and its recyclable potential. For the present research was carried out the collection of residues of gypsum lining board and subsequent separation and processing of this material. After the calcining process the material characterization (granulometry and unit mass) and chemical properties (free water, water of crystallization, calcium oxide content and sulfuric anhydride) of the gypsum in the form of powder were developed. The physical properties of the paste (normal consistency and bonding time) and the mechanical properties (surface hardness and compressive strength) in the hardened state were also analyzed. The results obtained were largely in accordance with the normalization, allowing a positive evaluation of the material. In view of the above, the feasibility of the recycling of gypsum from demolitions was certified, and the material complies with the standards in force and can be reused in its various civil construction applications.

**Keywords:** waste, environmental impact, characterization.



## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com SILVA<sup>(1)</sup> *et al* (2006 *apud* LIMA FILHO,2010)na indústria da construção civil o controle de rejeitos e resíduos tem se tornado de fundamental importância na execução de uma obra, tendo em vista que a quantidade de entulho pode provocar sérios problemas ambientais , uma vez que grande parte dos resíduos é depositada de forma irregular, como em lixões clandestinos , margens de rios e córregos, ou em aterros baldios, sendo um dos principais responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros em cidades de médio e grande porte.

Depois da nova resolução de nº 431 do CONAMA <sup>(2)</sup> de 24 de maio de 2011, onde o gesso passa a integrar o grupo B dos materiais residuais da construção civil, que corresponde aos materiais recicláveis, o estudo deste resíduo vem contribuindo para a retirada deste material do meio ambiente. A ideia de reciclagem do gesso, vem colaborar diretamente para a diminuição da extração da matéria prima gipsita da natureza e atuar no cenário socioeconômico do setor construtivo.

Os problemas com os resíduos de gesso não estão localizados apenas nos grandes centros urbanos, onde a construção civil emprega esses produtos, começam nas empresas que fabricam os pré-moldados e geram toneladas desse entulho sem destinação própria, na maioria dos casos deixados à beira de estradas e rodovias federais e estaduais e no entorno das fabricas como entulho indesejado (RIBEIRO, 2011) <sup>(3)</sup>.

Na região de Tucuruí todos os rejeitos da produção, tanto na utilização como material de fundição ou na aplicação de revestimento, são lançados nas estradas e vicinais e também descartadas em caçambas coletoras de entulhos na zona urbana e até mesmo nas vias públicas. Em consequência disso, o resíduo torna-se um agravante ao solo, lençóis freáticos e na paisagem urbana do município.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal buscar fortalecer a ideia de reciclagem dentro setor construtivo caracterizando este material para avaliar se as condições do gesso reciclados atendem o que preconiza a Norma ABNT NBR 12307:2017<sup>(4)</sup>, onde o material já se encontra mencionado como alternativa para uso em igual valor ao gesso comercial. Espera-se com isso, a busca pelo conhecimento técnico do material para que os conceitos de reciclagem sejam melhor concebidos na cultura local.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado na pesquisa foi o resíduo de gesso de demolição de forro. Os procedimentos experimentais se procederam no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará campus de Tucuruí. Sendo que todos os procedimentos adotados foram imprescindíveis para alcançar os objetivos propostos.

Inicialmente, fez-se necessário a coleta, trituração e reciclagem da amostra de resíduo de gesso (RG). Posteriormente, foram realizados os ensaios para caracterização do gesso reciclado, compreendendo: granulometria e massa unitária, água livre, água de cristalização, teor de óxido de cálcio e teor de anidrido sulfúrico. Por fim, procedeu-se o preparo da pasta e execução dos ensaios no estado fresco (consistência normal e tempo de pega), e estado endurecido (dureza superficial e resistência à compressão).

### 2.1 Coleta e beneficiamento do Resíduo de Gesso

O resíduo de gesso (RG) foi obtido a partir da coleta em uma determinada obra no município de Tucuruí –PA, onde a empresa responsável pelo serviço descartava os resíduos em caçambas estacionárias situadas próximo a obra. Todo o material utilizado foi proveniente de placas pré-moldadas de forro.

Vale ressaltar que a coleta foi realizada logo após o descarte evitando assim que o material se misturasse a outros produtos. Após a etapa de coleta do material, o mesmo foi levado para o laboratório da UFPA para a realização das próximas etapas previstas na pesquisa.

A trituração do material foi realizada em aparelho *Abrasão Los Angeles*, conforme figura 1. Para a limpeza do recipiente foi feito uma imprimação com 2kg de resíduos e 10 esferas com 100 rotações.

Figura 1- Aparelho Abrasão Los Angeles.





Na sequência, pós-limpeza do aparelho, duas amostras de 5kg foram submetidas ao tritramento com 1000 rotações em ambas, porém para a primeira amostra usou-se 10 esferas e na segunda 15, (Gouveia ,2013) <sup>(4)</sup>.

A massa triturada em ambas amostras foi peneirada em peneira 2mm, segundo a Norma ABNT NBR 12127: 2017<sup>(5)</sup> - Determinação das propriedades físicas do pó - a qual determina que o material para os ensaios de granulometria e massa unitária tem que ter seus grãos menores que 2mm. Essa granulometria inicial de 2mm é a mesma requerida para o gesso comercial. O resultado deste procedimento possibilitou a escolha de uma opção que mais se adequasse quanto ao melhor processo de trituração, os resultados estão descritos na Tabela 1. Para este parâmetro foi adotado procedimento da amostra 2.

**Tabela 1- Aproveitamento da trituração.**

	<b>Peso da amostra (g)</b>	<b>Nº de esferas</b>	<b>Nº de rotações</b>	<b>Material passado na peneira 2mm (g)</b>
<b>Amostra 1</b>	5000	10	1000	2783,8
<b>Amostra 2</b>	5000	15	1000	4514,5

## **2.2 Re-calcinação**

Do material obtido na amostra 2, foram separados 2kg, na sequencia esta amostra foi quarteada e levada para secar em estufa, conforme figura 2. A temperatura utilizada foi 140°C, para um período de 24 horas.

**Figura 2- amostra quarteada.**





## **2.3 Determinação das propriedades físicas do pó**

### **2.3.1 Determinação da granulometria**

Para iniciar o ensaio foi preparada uma amostra de 300g do material e passado na peneira 2,0mm. Da amostra anterior foi retirado 210g para atingir massa constante em estufa à 40°C. Em seguida uma nova amostra de 50g foi separada para passar na peneira 0,29mm, conforme preconiza a Norma ABNT NBR 12127: 2017.

### **2.3.2 Determinação da massa unitária**

Esse parâmetro trata-se da relação entre a massa não compactada de material e o volume do recipiente. Para a determinação da massa unitária utilizou-se amostras de 100g de RG, essas foram colocadas para passar por um conjunto (funil mais recipiente) até o enchimento do recipiente, na sequência fez-se o rasamento e pesagem do conjunto. Este procedimento se repetiu para que uma média fosse feita entre os resultados. Essa amostra deve ser considerada válida caso a diferença entre as amostras não ultrapasse 5% desta média. Foram executados dois ensaios para que se cumprisse o que rege a norma, a Tabela 2 mostra os detalhes desta execução.

**Tabela 2 - Preparação da amostra para ensaio de massa unitária.**

<b>Ensaio</b>	<b>Amostras (g)</b>	<b>Média (g)</b>	<b>Diferença</b>	<b>Verificação</b>	<b>Resultado</b>
1	A 796,8	825,3	57 g	>5%	Não passou
	B 853,8				
2	A 842,4	858,1	31,4 g	<5%	Passou
	B 873,8				

## **2.4 Determinação das propriedades físicas da pasta**

### **2.4.1 Determinação da consistência normal**

O ensaio de consistência normal fixa a relação água/gesso para que a pasta obtenha uma fluidez adequada para manipulação. O procedimento atendeu o que preconiza a Norma ABNT NBR 12128: 2017<sup>(6)</sup> – Determinação das propriedades físicas da pasta – e iniciou-se com a preparação de uma amostra de 3000g de GR, em seguida preparou-se uma solução com 20g/L de citrato de sódio para usar com retardador. Posteriormente foram transferidos 10g desta solução um recipiente e adicionado 150g de água destilada. A massa de GR foi então misturada em diferentes quantidades



até obter a consistência determinada pela norma. A primeira amostra de pasta foi adotada na proporção de 0,6 água/GR. As massas obtidas foram transferidas para tronco de cone previamente lubrificado e a aferição das amostras foram feitas em aparelho *Vicat*. O ensaio da relação água/gesso é determinado quando a penetração na pasta alcança 30mm. Os tempos de início e fim de pega foram marcados em cronômetro ligado desde o momento que o gesso entra em contato com a água.

## 2.5 Determinação das propriedades mecânicas

### 2.5.1 Preparação da pasta e moldagem dos corpos de prova

A pasta preparada para a fundição dos corpos de prova para os ensaios mecânicos obedeceu aos requisitos utilizados na determinação da consistência normal, onde a relação água/GR foi de 0,51. Os corpos de prova foram feitos simultaneamente em molde com capacidade para 3 corpos de provas cúbicos de arestas com 50mm, de acordo com Norma ABNT NBR 12129:2017<sup>(7)</sup>.

Para a preparação da amostra 3000g GR foram separada para a moldagem dos corpos de prova. O molde utilizado foi uma adaptação feita com madeira revestida com E.V.A. (Espuma Vinílica Acetinada) no intuito de atender os requisitos fixados em Norma, o molde adaptado é ilustrado na Figura 3.

Figura 3- molde adaptado e execução do ensaio.



### 2.5.2 Determinação da dureza superficial

Após o desmolde, os corpos de prova ficaram em ambiente de circulação normal à temperatura de 28 ° C a 45° C, até o momento de massa constante e em seguida passaram para dessecador por 24h e foram submetidos ao ensaio imediatamente após a retirada de dessecador, para tanto foi utilizado uma prensa manual universal da marca *Solotest*.



Na obtenção da dureza superficial usou-se uma esfera de diâmetro 10mm sob a ação de uma carga inicial de 50 N e após 2 segundos aplicou-se a carga de 500N, mantendo esta carga sobre o corpo de prova por 15 segundos prosseguindo com a aferição da impressão.

### 2.5.3 Determinação da resistência à compressão

Com os mesmos corpos de prova do ensaio de dureza foram feitas as medições das resistências à compressão em aparelho de prensa de ensaio a compressão para argamassas da marca *Matest*, devidamente configurado para as dimensões dos corpos de prova conforme a figura 4.

**Figura 4- Aparelho Matest configurado para o corpo de prova.**



## 2.6 Determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.

### 2.6.1 Determinação da água livre

O ensaio de determinação de água livre verifica a quantidade de água que a massa possui que não interfere na cristalização da partícula, este procedimento está descrito na Norma ABNT NBR 12130:2017<sup>(8)</sup>. A água livre foi calculada, tomou-se uma amostra de 50g de GR e posteriormente foi levada à estufa na temperatura de 40°C até a massa constante.

### 2.6.2. Determinação da água de cristalização

Este ensaio determina a quantidade de água responsável para a cristalização da partícula de GR. O ensaio iniciou-se com a separação de uma amostra do obtida no ensaio de água livre de 2g e



levada a estufa à temperatura de 230°C até a massa constante. Depois de atingir a massa constante a amostra foi pesada e nomeada M<sub>2</sub>.

### 2.6.3. Determinação do óxido de cálcio

Tanto para a determinação do teor óxido de cálcio quanto para a determinação do teor anidrido sulfúrico foi preparada uma amostra tratada de GR e solução de ácido clorídrico (HCL) com água destilada. Este ensaio foi realizado por meio de titulação da amostra com uma solução de permanganato de potássio 0,1N (KMnO<sub>4</sub>) a que foi preparada e colocada em repouso durante uma semana.

Da amostra de GR e ácido clorídrico (HCL) foi tomada uma alíquota de 100ml e adicionado 100ml de água destilada, gotas de ácido nítrico concentrado (HNO<sub>3</sub>) foram adicionados à solução e levada à aquecimento de 100°C. Foram adicionados ainda nesta solução, as soluções de cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>CL) e hidróxido de amônio concentrado (NH<sub>4</sub>OH). A solução foi posta novamente em repouso em banho-maria e em seguida filtrada em ao processo de filtração lenta até a eliminação dos cloretos, o ensaio foi feito em duplicata.

A solução obtida foi reduzida para 250ml e regada com oxalato de amônio para a precipitação do cálcio e posta novamente para descansar em banho-maria por 1 hora. Em seguida a solução passou por filtração lenta com uma sequência de 10 lavagens com água quente. Após este procedimento foram adicionados 20ml de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e completado com água até o volume de 200ml, estes procedimentos foram realizados em duplicata.

A titulação foi realizada com a solução de permanganato de potássio sobre a amostra resultante dos procedimentos, após a determinação do *Equivalentes*, realizou-se então a determinação do óxido de cálcio.

### 2.6.4. Determinação do anidrido sulfúrico

Para este ensaio usou-se uma alíquota de 10 ml da solução de GR e ácido clorídrico (HCL) completado com água até o volume de 200ml e após aquecimento foi adicionado uma solução de cloreto de bário (100g/L), (10 ml). Após descansar por 24h a solução foi levada à mufla a 900°C para atingir massa constante.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

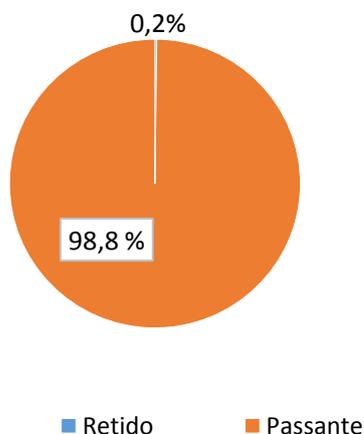
#### 3.1 Propriedades físicas do gesso em forma de pó

##### 3.1.1 Granulometria

Os ensaios realizados atenderam o que estabelece parâmetros de aceitação do gesso de fundição para a construção civil, prevê como requisito a material de gesso passante na peneira 0,29mm seja  $\geq 90\%$ .

Estabelecidos os critérios, os resultados obtidos para a granulometria consistiram no peneiramento do GR na peneira de abertura nominal 0,29mm em duplicata, o material retido atendeu aos requisitos fixados pois, após término do peneiramento a massa retida teve um peso de 0,1g nas duas amostras ensaiadas. O Gráfico 1 exibe o resultado do ensaio.

Gráfico 1 - Ensaio de granulometria.



##### 3.1.2 Determinação da massa unitária

De acordo com os procedimentos de execução de ensaio com o resíduo de gesso, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Massa unitária do resíduo de gesso.

Material (g)	Mu(g/cm <sup>3</sup> )	Mu exigida
GR	910,47	Mu $\geq$ 600



De acordo com Tabela 3 a massa unitária obtida foi de 910,47 g/cm<sup>3</sup>, para ser considerada satisfatória a razão da massa e o volume do recipiente tem que ser  $\geq 600$  g/cm<sup>3</sup>. De acordo com o resultado a massa unitária do ensaio do gesso reciclado atendeu aos parâmetros exigidos.

### 3.2 Água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.

Os valores encontrados para os ensaios químicos para a determinação da água livre, determinação da água de cristalização, teores de óxido de cálcio e teores de anidrido sulfúrico do GR estão disposto na Tabela 4.

Tabela 4 - resultados dos ensaios químicos do GR.

	Água livre	Água de cristalização	Óxido de cálcio (CaO)	Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )
Valor obtido (%)	0,43	1,5	23,84	-
Exigido pela NBR 13207 (%)	Máx. 1,3	4,2 a 6,2	Mín. 38	Mín. 53

De acordo com resultado da Tabela 4, o teor de água livre e de água de cristalização estão de acordo ao estabelecido, para limite máximo de água livre 1,3 % e para água de cristalização entre os valores de 4,2 a 6,2%, os resultados marcaram respectivamente 0,43 % e 1,5%. Para os ensaios de teores de Óxido de Cálcio (CaO) o ensaio determinou um teor de 23,84 %, inferior ao valor de teor mínimo de 38%.

Não foram obtidos resultados para teores de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) neste trabalho, pois, para o resultado deste ensaio era necessário que a amostra ficasse em mufla até a massa constante, no entanto, o ensaio foi paralisado porque o aparelho não atingiu a temperatura exigida. E, embora os teores de óxido de cálcio não tenham alcançado o valor mínimo, observa-se por análise, que os valores para a água total do composto foram satisfatórios e que relativamente o valor da anidrita do composto analisado está superior a 90%.

Segundo Baltar *et al* (2005) *apud* Calvo (2003), a anidrita só assume outra forma sob temperaturas que variam de 180 a 250° C.



### 3.3 Determinação das propriedades físicas da pasta

#### 3.3.1 Propriedades físicas da pasta para a consistência normal

A definição da consistência normal da pasta é um procedimento que determina a melhor relação água/gesso na qual se obtém uma fluidez da pasta adequada à manipulação. Os resultados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades físicas da pasta para a consistência normal.

Relação água/gesso (g)	Aferição (mm)	Resultado	Exigido pela NBR
0,60	0,0	Não atende	3,00 mm
0,50	37	Não atende	
0,52	27,5	Não atende	
0,51	3,00	Atende	

De acordo com o resultado, a consistência que atendeu o valor normativo de 3mm no aparelho *Vicat* foi a de 0,51. Ressalta-se que, o aparelho *Vicat* utilizado não teve modificações (previstas pela norma) e possivelmente houve diferença na obtenção de um melhor resultado.

#### 3.3.2 Propriedades físicas da pasta para os tempos de início e fim de pega

Com a pasta da consistência normal obtida foram realizados os ensaios de tempos de início e fim de pega. A figura 5 apresenta o esquema de calor de hidratação da pasta de gesso e os resultados deste ensaio está descrito na Tabela 6.

Figura 5- Esquema da curva de hidratação da pasta de gesso.

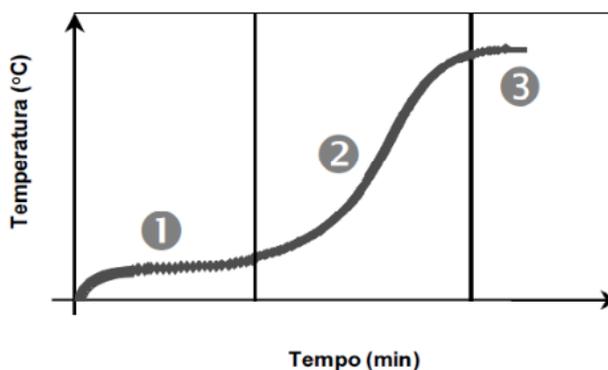




Tabela 6 - Resultado do ensaio de tempo de pega.

Consistência normal	Início de pega	Fim de pega	Exigido pela NBR	
0,51	17'17"	27'33"	≤ 10	≤ 20

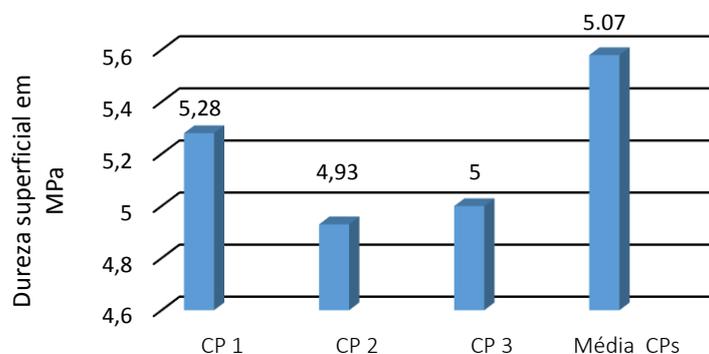
De acordo com o resultado, tanto para o tempo de início de pega quanto para o fim de pega a pasta não obteve o resultado esperado, sendo o tempo obtido para início de pega de 17'17" e para o fim de pega de 27'33". No entanto atende esses resultados atendem os parâmetros para o gesso de revestimento (sem aditivos) e gesso para revestimento (com aditivos).

### 3.4 Determinação das propriedades mecânicas

#### 3.4.1 Propriedade da dureza

O ensaio foi determinado a partir da média de aferição em três corpos de prova de dimensões 50x50x50mm. Os resultados para a dureza superficial obtidas no ensaio estão no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Dureza superficial.



Conforme o Gráfico 2, foi obtido o resultado para a dureza superficial de 5,07 N/mm. O resultado não atendeu a NBR, entretanto, para o ensaio não foram estabelecidas datas de cura, a norma não estabelece, as aferições das propriedades mecânicas foram realizadas logo após terminado o processo isotérmico das amostras. Porém, baseado em literaturas podemos verificar que o material aumenta suas resistências mecânicas em várias datas posteriores.

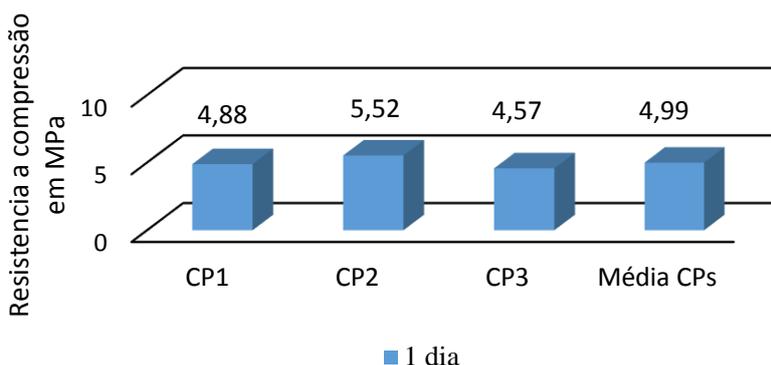
#### 3.4.2 Resistência a compressão

Os corpos de prova foram submetidos a prensa para a determinação da sua resistência a compressão, que define determinação da densidade aparente no gesso no momento de sua



ruptura. A ABNT NBR 13207:2017<sup>(9)</sup> não determina parâmetros para a idade de ruptura para ensaio de resistência a compressão, todavia os resultados obtidos foram analisados de acordo com as literaturas pesquisadas. O Gráfico 3 mostra os resultados obtidos para a idade de 1 dia.

Gráfico 3 - Resultados obtidos para a idade de 1 dia.



Como mostra o Gráfico 3, para a idade de 1 dia os corpos de prova tiveram uma média de resistência de 4,99 Mpa. Entretanto, para efeito de relação à estudos anteriores, verificou-se que os valores obtidos foram compatíveis com os resultados de alguns autores. Neste contexto, Apolinário (2015)<sup>(10)</sup>, obteve para o gesso reciclado uma média de resistência a compressão de 5,05 Mpa.

#### 4. CONCLUSÃO

O gesso reciclado produzido em laboratório foi ensaiado segundo as exigências normativas vigentes e pode-se observar que quanto aos requisitos do pó o GR atende na granulometria com mais de 90% de material passado na peneira de abertura nominal 0,29mm. A massa unitária obtida superou os parâmetros estabelecidos com o valor 910,47g/cm<sup>3</sup>, o GR atendeu ao estabelecido que é uma compactação  $\geq 600\text{g/cm}^3$ .

Nos ensaios químicos o GR atende nas determinações da água livre e de cristalização que chegaram ao resultado de 0,43% e 1,5% respectivamente. A verificação do teor de anidrido sulfúrico na amostra ensaiada não pôde ser concluída por inviabilidade energética do laboratório de química, já o resultado quanto ao teor de óxido de cálcio os resultados mostraram que a amostra de GR ficou abaixo do mínimo especificado pela norma.



Para a determinação da consistência normal foi observado que a pasta obtida com a relação 0,51 de água /GR comprometeu a trabalhabilidade. No entanto, a consistência obtida atende para a execução de revestimento. Para os tempos de cura, com a consistência obtida não foi possível atender os requisitos de início e fim de pega para gesso de fundição, mas atendeu para o gesso de revestimento com e sem aditivos.

Para os ensaios de resistência mecânica, quanto a dureza as amostras não atingiram o que especifica a norma, isso pode ter ocorrido devido ao fato de não ter havido datas posteriores de cura. Entretanto, como foi dito no capítulo respectivo, os estudos realizados comprovaram que em idades superiores a 1 dia o GR alcança os valores exigidos em norma. Da mesma forma em relação ao ensaio de resistência a compressão, onde o resultado obtido com o ensaio não atendeu ao que prescreve a norma, mas foi similar aos resultados obtidos por outros autores para a idade de 1 dia.

## 5. REFERÊNCIAS

1. LIMA FILHO, Hilário Jorge Bezerra de. **Tratamento dos resíduos de gesso da construção e da demolição- RCD para a produção de gesso**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
2. Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, estabelecendo nova classificação para o gesso. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 25 maio 2011.
3. RIBEIRO, Abrahão Severo. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufpb-ct, Universidade Federal de Pernambuco, João Pessoa, 2006.
4. GOUVEIA, Fernanda Pereira. **Efeito da adição de filer gesso nas propriedades dos ligantes asfálticos e concretos asfálticos**. 2013. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**: Gesso para construção – determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2017.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12128**: gesso para construção – determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro, 2017.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: gesso para construção – determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2017.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12130**: gesso para construção – determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2017.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: gesso para construção civil – apresentação. Rio de Janeiro, 2017.



10. APOLINARIO, Giovani Mateus. **Reutilização do resíduo de gesso da construção civil**. 2015. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2015.



## ESTUDO DA LAMA VERMELHA COMO FÍLER EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

**Maxwell K. Degen<sup>(1)</sup>; Thiago C. Cardoso<sup>(2)</sup>; Rayara P. Costa<sup>(3)</sup>; Ângela B. Masuero<sup>(4)</sup>; Denise C. C. Dal Molin<sup>(5)</sup>**

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – maxdegen@hotmail.com; (2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – thiagocostacardoso@gmail.com; (3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – rayarapintocosta@gmail.com; (4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – angela.masuero@ufrgs.br; (5) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – dmolin@ufrgs.br

### RESUMO

A lama vermelha é um resíduo resultante do beneficiamento da bauxita para produção da alumina pelo processo Bayer. Ela é constituída por sólidos insolúveis (óxidos) em solução de soda cáustica. A cor avermelhada é resultante da elevada quantidade de ferro presente neste resíduo. A produção mundial de lama vermelha gira em torno de 90 milhões de toneladas todo ano. A disposição e descarte inadequado desse material geram riscos ao meio ambiente e à sociedade. Assim, é importante estudos para o reaproveitamento desse resíduo em outros setores da economia. Como a construção civil é um setor da economia brasileira que demanda grande consumo de materiais cimentícios, o presente estudo buscou analisar a viabilidade da utilização da lama vermelha em uma matriz cimentícia. O material foi utilizado como filer em substituição ao cimento nas proporções de 5%, 10% e 15% em massa para a produção de concreto. Foram realizados ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto confeccionado incluindo resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e absorção por capilaridade. Também se executou ensaios de durabilidade para identificar a possível presença de expansibilidade e reação álcali-agregado decorrendo da utilização da lama vermelha na matriz cimentícia em argamassa. Os resultados mostraram que a utilização da lama vermelha como substituto parcial do cimento promove o aumento da resistência mecânica, mas seu uso pode gerar reações expansivas.

**Palavras-chave:** lama vermelha, concreto, filer, resíduo.

## STUDY OF RED MUD AS A FILLER IN CEMENT MATRIX

### ABSTRACT

Red mud is a residue from the processing of bauxite for the production of alumina by the Bayer process. It consists of insoluble solids (oxides) in caustic soda solution. The reddish color is the result of the high amount of iron present in this residue. According to some authors, the world production of red mud turns around 90 million tons every year. The inappropriate storage and discard of this material creates risks to the environment and society. Thus, it is important studies for the reuse of this residue in other sectors of the economy. As the civil construction is a Brazilian economy sector that demands large consumption of cementitious materials, the present study sought to analyze the viability of the use of red mud in a cement matrix. The material was used as a filler to replace the cement in the proportions of 5%, 10% and 15% in concrete. It was carried out studies to evaluate the physical and mechanical properties of the concrete produced including simple compression test, diametral compression and capillary absorption. It was also carried out tests of durability to identify the possible presence of expansibility and alkali-aggregate reaction resulted from the use of the red mud in cementitious mortar matrix. The results showed that the use of red mud as partial replacement of the cement promotes the increase of the mechanical resistance, but its use can generate expansive reactions.

**Key-words:** red mud, concrete, filler, residue.



## 1 INTRODUÇÃO

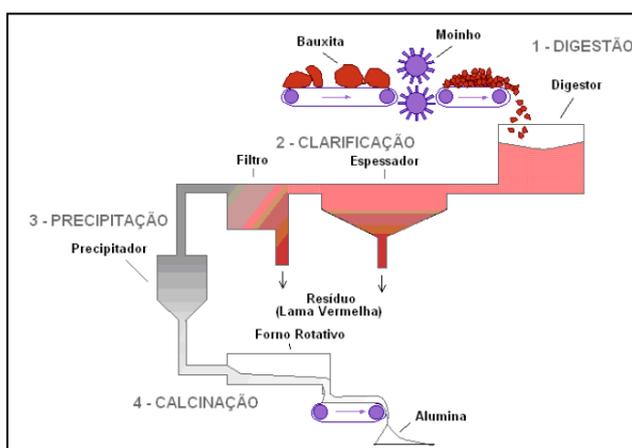
### 1.1. Processo de geração

A lama vermelha é um resíduo, proveniente do processo Bayer no qual a bauxita é submetida a um processo químico e eletrolítico para produção alumina (óxido de alumínio). A alumina é empregada na produção do alumínio primário. Esse processo é utilizado nas plantas de produção de alumina desde 1893 e foi desenvolvido por Josef Bayer<sup>(1,2)</sup>. Inicialmente desenvolvido para a indústria têxtil, que emprega a alumina como fixador para o tingimento do algodão, ela passou a ser utilizado na produção da alumina substituindo o processo Le Chatelier pela redução dos custos de produção<sup>(1)</sup>.

O fundamento do processo Bayer consiste na separação da alumina de outros componentes como óxido de ferro, titânio e cálcio. Assim, a bauxita é aquecida sob condições de altas temperaturas e pressão em soda cáustica para formar uma solução de aluminato de sódio deixando um resíduo insolúvel chamado de lama vermelha. Esse resíduo é composto de óxidos e alumina não dissolvida. A cor avermelhada é resultado do elevado teor de ferro presente na bauxita. O aluminato de sódio é filtrado e os cristais de hidróxido de alumínio precipitam. Este último pode ser vendido desta maneira ou calcinado para formar o óxido de alumínio (alumina)<sup>(2)</sup>. O foco principal das refinarias é a máxima recuperação da soda cáustica presente na lama vermelha para reutilizar novamente no seu processo de extração da alumina da bauxita.

O processo Bayer é composto de quatro etapas ilustradas na Figura 1, quais sejam: digestão, clarificação, precipitação e calcinação.

Figura 1: Fluxograma e Esquema do processo Bayer (Fonte: WAO (2003) apud Silva Filho et al. (2007))<sup>(1)</sup>.



A primeira etapa do processo Bayer consiste na moagem da bauxita, seguido pelo processo de digestão da mesma em uma solução de hidróxido de sódio sob determinadas temperaturas e pressão. A ideia é que o alumínio presente na rocha se dissolva e forme uma solução verde. Na próxima etapa chamada de clarificação, realiza-se a separação entre a fase sólida constituída de resíduo insolúvel (lama vermelha) e a fase líquida



constituída pela solução. Esta etapa é ainda subdividida em espessamento e filtração. No espessamento ocorre a decantação do material para aumentar o teor de sólidos e recuperar parte do hidróxido de sódio a ser reutilizado novamente no processo. Posteriormente, tem-se a etapa de precipitação com o resfriamento da fase líquida e precipitação da alumina cristalizada. Finalmente, acontece a fase final do processo Bayer, onde ocorre a calcinação da alumina a uma temperatura de aproximadamente 1000°C. Durante a etapa de clarificação é produzido o resíduo de bauxita, também conhecido como lama vermelha, que é constituído principalmente por óxidos insolúveis <sup>(1)</sup>.

## 1.2. Quantidade produzida

O alumínio é o segundo metal mais produzido no mundo com uma produção anual estimada de 45 milhões de toneladas em 2011<sup>(2,3)</sup>. O consumo per capita do metal atinge 37 kg nos EUA, 31 kg no Japão, 19 kg na Europa Ocidental e 3,9 kg no Brasil <sup>(3)</sup>. O metal alumínio não ocorre naturalmente, mas o elemento alumínio está presente em várias rochas e minerais. Para obter o metal, o elemento alumínio precisa ser extraído e passar por um processo químico e eletrolítico <sup>(2)</sup>. O principal material que origina o alumínio metal é o óxido de alumínio ou também chamada alumina. Segundo ABAL (2017), o Brasil figura na décima primeira posição na produção de alumínio primário antecedido pela China, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Índia, Austrália, Noruega, Bahrein e Estados Unidos. Segundo essa mesma organização o Brasil ocupa a terceira posição como produtor mundial de bauxita e alumina, sendo antecedido pela Austrália e China. As reservas mundiais de bauxita totalizam 28 bilhões de toneladas dos quais 2,6 bilhões de toneladas de bauxita estão no Brasil<sup>(4)</sup>. Aproximadamente, 92% da produção mundial de bauxita é utilizada na produção de alumina enquanto que o restante é destinado à indústria de produtos refratários e químicos<sup>(3)</sup>. A produção mundial de alumina no ano 2008 foi de 60 milhões de toneladas<sup>(3)</sup>.

Em nível das federações, o Pará é responsável por 93,1 % da produção nacional de bauxita<sup>(4)</sup>. A segunda e terceira posição são ocupadas por Maranhão e São Paulo, respectivamente. Tem-se que 5 toneladas de bauxita processadas com 0,14 toneladas de soda cáustica na etapa de digestão do processo Bayer produzem 2 toneladas de alumina, que quando submetidas ao processo de redução, produzem 1 tonelada de alumínio<sup>(3)</sup>.

Quanto à lama vermelha, ela é um resíduo sólido oriundo da produção da alumina pelo processo Bayer sob o qual é submetido a bauxita. A alumina é utilizada para produzir alumínio primário<sup>(5)</sup>. Sabe-se que mais de 95% da alumina produzida mundialmente é derivada do processo Bayer e que as propriedades químicas e físicas da lama vermelha resultante deste processo são influenciadas tanto pelo processo de cada unidade produtora como pela natureza da bauxita<sup>(2)</sup>.

Segundo alguns autores a produção mundial de lama vermelha gira em torno de 90 milhões de toneladas todo ano<sup>(5)</sup>. Enquanto outros acreditam que os 120 anos de extração de alumina da bauxita já gerou um saldo de



2,7 bilhões de lama vermelha o qual cresce aproximadamente 120 milhões de toneladas por ano<sup>(6)</sup>. A quantidade de lama vermelha oriunda do processo Bayer de refinamento da alumina pode variar de 0,3 a 2,5 toneladas por tonelada de alumina ou de 0,7 a 2 toneladas de resíduo por tonelada de alumina produzida<sup>(2)</sup>.

Quanto à produção de lama vermelha no Brasil, estima-se que são produzidos anualmente 10,8 milhões de toneladas considerando a capacidade produtiva das empresas atuantes no setor em 2012. Mas este valor pode variar entre 3,24 e 27 milhões de toneladas<sup>(7)</sup>.

### 1.3. Impactos ambientais

A forma de descarte e armazenamento da lama vermelha em cada unidade de produção de alumina depende de fatores como a disponibilidade de terra, a proximidade com o mar, clima, logística, natureza do resíduo e legislação local<sup>(2)</sup>. Inicialmente, o descarte desse material era realizado no próprio local de operação ou em plantas próximas. Entretanto, com o desenvolvimento da indústria e aprimoramento das tecnologias e aumento da preocupação com os impactos ambientais, as empresas passaram a melhorar suas técnicas de gerenciamento desse resíduo de modo a minimizar a contaminação e facilitar a recuperação dessas áreas após o fim de vida útil.

Entre as técnicas utilizadas para o descarte desse resíduo existem o lançamento do mesmo no mar por meio de tubulações que ligam a costa até o fundo do oceano (esse método está praticamente extinto) e o depósito em lagunas que podem ser depressões, minas antigas e vales represados. Algumas dessas lagunas recebem tratamento para evitar a infiltração do resíduo em águas subterrâneas. Durante um período a lagoa seria preenchida (com uma pasta fluida diluída com 15-20% de sólidos), os sólidos se consolidariam e a área poderia ser reabilitada. Outra técnica também empregada é o descarte a seco onde o resíduo é aspirado ou filtrado a alta pressão para formar um bolo semi-seco com quantidade de sólidos maior que 65%<sup>(2,3)</sup>.

A principal metodologia utilizada atualmente é conter o resíduo dentro de áreas de descartes para posterior reabilitação. Após atingir a sua capacidade limite de armazenamento, a ideia é que o local seja utilizado para propósitos industriais, civis ou rearborizado para garantir a fusão com o ecossistema circundante<sup>(6)</sup>. Todavia, a capacidade das áreas de armazenagem dura em média entre 4 a 7 anos, e a reabilitação da área se processa lentamente<sup>(1)</sup>.

Pode-se ainda realizar a neutralização da lama vermelha para reduzir a sua alcalinidade para um estado menos perigoso (redução do pH de 11-13 para em torno de 8). Assim, reduz-se o impacto ambiental gerado pelo armazenamento do material após o encerramento dessa atividade uma vez que o sódio é adsorvido, os minerais tampão são neutralizados e os metais tóxicos tornam-se insolúveis a esse pH. Entretanto, são processos caros e são adotados por poucas indústrias<sup>(5)</sup>.



O método de descarte da lama vermelha quando efetuado de maneira inadequado pode causar a contaminação da água de superfície e subterrânea por hidróxido de sódio, ferro, alumínio e outros agentes químicos e resultar em impacto visual pelo vento carregar o pó do resíduo<sup>(1)</sup>. A lama vermelha quando não tratada possui um pH elevado entre 11-13 o que torna impossível o crescimento das plantas. Assim, a problemática ambiental atrelada ao descarte da lama vermelha se refere principalmente ao seu elevado pH, ao risco de infiltração alcalina na água subterrânea, problemas de segurança com o seu armazenamento, emissões de pó atmosférico alcalino, grande área de terra necessária para o descarte e a presença de quantidades menores de metais pesados e o risco de infiltração de núclídeos radioativos na água subterrânea<sup>(5)</sup>.

Quanto à classificação da lama vermelha como resíduo perigoso, não existe um consenso na literatura. A lama vermelha não é considerada resíduo perigoso pela United States Environmental Protection Agency (EPA). Para esta organização esse resíduo entra em uma categoria de vinte resíduos de processamento mineral que estão qualificados para a exclusão do regulamento federal sobre resíduos perigosos<sup>(8)</sup>. Já alguns autores, a consideram um material relativamente tóxico por apresentar elevados teores de hidróxido de sódio<sup>(9)</sup>. Mercury et al. (2010) classificaram a lama vermelha, segundo a NBR 10.004/2004 da Associação brasileira de normas técnicas (ABNT), como resíduo Classe I – perigoso por possuir alta corrosividade e reatividade<sup>(10,11)</sup>. A divergência quanto à classificação da lama vermelha como resíduo perigoso é resultado das diversas metodologias de avaliação e da variação da sua composição química o qual depende da bauxita e do processo de refinamento empregado em cada unidade de produção da alumina<sup>(12)</sup>.

#### **1.4. Caracterização química, física e ambiental**

As características mineralógicas da bauxita e os reagentes químicos usados na etapa de beneficiamento exercem forte influência sobre a composição química da lama vermelha, sendo que existem consideráveis diferenças na proporção dos compostos químicos em função da origem desse resíduo, conforme observado na Tabela 1. Além disso, é notória a amplitude da faixa de atividade pozolânica para a lama vermelha, representada pelo somatório dos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , variando de 36% a 76%, o que confere ao resíduo um baixo potencial como adição mineral pozolânica, sobretudo, devido ao baixo teor de  $\text{SiO}_2$  (em geral, inferior a 20%). Durante o processo Bayer, são empregados produtos químicos alcalinos, com alto teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , que refletem no pH do resíduo in natura e na estabilidade de fases minerais, tornando-as susceptíveis às reações expansivas.



Tabela 1: Composição química da lama vermelha obtida pelo processo Bayer (Fonte: autor (2018)).

Compostos químicos		Quantidade (%)				
		Ribeiro <i>et al.</i> (2010)	Liu <i>et al.</i> (2011)	Ribeiro <i>et al.</i> (2013)	Senff <i>et al.</i> (2014)	Bayat <i>et al.</i> (2018)
		ALCOA - MG (Brasil)	Shandong Alumina (China)	ALCOA - MG (Brasil)	ALCOA (Espanha)	Jajarm Alumina (Irã)
Óxido de silício	SiO <sub>2</sub>	14,34	18,0	19,70	5,54	13,26
Trióxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,85	12,38	27,30	51,80	20,54
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,87	6,31	27,30	18,80	15,41
Óxido de cálcio	CaO	4,61	35,09	6,33	3,27	19,87
Óxido de magnésio	MgO	-	1,13	0,47	-	1,50
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	7,35	2,71	6,84	6,84	5,87
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	1,87	0,45	2,57	0,08	0,73
Óxido de titânio	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,66	3,32	3,65	11,2	4,97
Óxido de manganês	MnO	0,21	-	0,29	0,04	-
Sulfato	SO <sub>3</sub>	-	0,54	-	0,23	0,54
Cloro	Cl	-	-	-	0,02	-
Outros		1,01	2,00	2,29	2,02	0,99
Perda ao fogo		27,20	-	-	0,16	16,32

A Tabela 2 sintetiza as principais fases minerais da lama vermelha obtidas pela técnica de difratometria de raios X. O tipo e as condições do tratamento aplicado ao resíduo exercem forte influência nas fases minerais, sendo a influência da calcinação o principal tema de pesquisa uma vez que não existe consenso na literatura acerca da temperatura ótima para calcinação nem sobre os potenciais benefícios desse tratamento nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios. Pera *et al.*<sup>(13)</sup> recomendam que o resíduo seja calcinado a temperatura entre 600 °C e 800°C pois esse tratamento melhoraria o seu potencial pozolânico, chamando o resíduo de “pigmento pozolânico”. Resultado similar foi obtido por Liu *et al.*<sup>(14)</sup> em que eles detectaram que na faixa de temperatura entre 600 e 700°C ocorre o maior pico de Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, composto que ao se hidratar resulta na formação de silicatos de cálcio. Em contrapartida, outros autores<sup>(15, 16)</sup> não observaram diferenças significativas nos resultados de ensaios referentes às propriedades mecânicas e de durabilidade para o resíduo incorporado à matriz cimentícia nas condições seca/desaglomerada e calcinada.



Tabela 2: Principais fases minerais encontradas na lama vermelha (Fonte: Redmudorg (2015)).

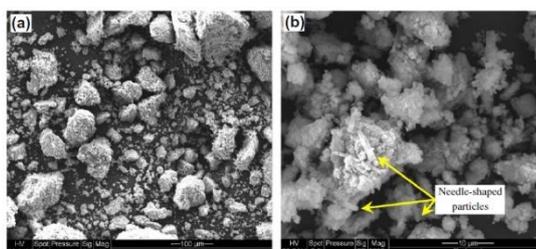
Principais fases minerais associadas à lama vermelha							
Componentes químicos	Hematita	Goethita	Gibbsita	Boehmita	Diaspore	Calcita	Cálcio aluminato hidratado
	$Fe_2O_3$	$Al_xOOH$	$Al(OH)_3$	$AlO(OH)$	$AlO(OH)$	$CaCO_3$	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$
	Quartzo	Rutila	Anatase	Caulinita	Sodalita	Alumino silicato	Cancrinita
	$SiO_2$	$TiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$	$Na_8(Al_6SiO_6 \cdot C_{24})Cl_2$	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	$NaAlSiO_4 \cdot 6CaCO_3$

A caracterização física de diferentes lamas vermelha é reunida na Tabela 3, onde se destacam o elevado pH e módulo de finura do resíduo. Embora o diâmetro médio dependa do tipo de tratamento ao qual é sujeito, em geral, ele é inferior ao do cimento, viabilizando seu emprego como filler na matriz cimentícia. Conforme a Figura 2, o emprego do resíduo em situação seca e peneirada (#200) potencializa a densificação da matriz cimentícia em função da nucleação de produtos de hidratação decorrente de sua elevada área superficial.

Tabela 3: Caracterização física da lama vermelha obtido pelo processo Bayer (Fonte: autor (2018)).

Caracterização física	Estudos realizados				
	Ribeiro <i>et al.</i> (2010)	Liu <i>et al.</i> (2011)	Senff <i>et al.</i> (2014)	Zhang <i>et al.</i> (2018)	Bayat <i>et al.</i> (2018)
Massa específica	2,90	2,90	-	2,95	-
Módulo de finura ( $m^2/g$ )	20,27	20,9	20	35,419	1,18
% passante na peneira 45 $\mu m$	67,85	-	-	-	4,1
Diâmetro médio (nm)	8,0	-	78,0	3,702	-
pH'	12,95	-	-	10,0	10,3

Figura 2: Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários: (a). Material in natura; (b) Material passante na peneira # 200. Fonte: He et al b. (2016).



Quanto à perspectiva ambiental, o resíduo possui na composição química diversos metais pesados, tais como titânio, manganês, ferro, zinco e alumínio. Todavia, diversos estudos (17, 18, 19) apontam que os mesmos não são



solubilizados ou lixiviados em água. Entre esses estudos, a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos e os limites recomendados para uma lama vermelha proveniente da Índia. Nela, somente o teor de alumínio encontra-se superior ao previsto pela ISO 10500 <sup>(20)</sup>.

Tabela 4: Concentração de metais pesados lixiviados na água de duas fontes do resíduo de lama vermelha passante na peneira 75 µm na Índia e os limites máximos recomendados (Fonte: Adaptado de Alam et al. (2013)).

Metais pesados	Concentrações (mg/l)			
	Fonte1	Fonte 2	Limite aceitável	Observações
Cu	0,011	0,011	2,0	Limites aceitáveis por pessoa para a qualidade da água para consumo humano pela Organização Mundial da Saúde.
Fe	3,359	1,832	1,0-3,0	
Zn	0,021	0,023	0,01-0,05	
Ni	0,002	0,018	0,070	
Ca	0,793	0,364	75,000	Limites aceitáveis por pessoa pela ISO 10500: 2012
Mg	2,197	2,217	30,000	
Al	12,750	6,55	0,030	

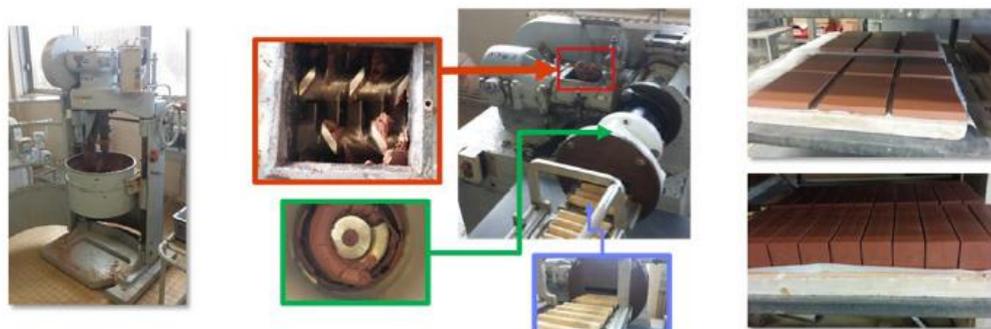
## 1.5. Restrições e potencialidades de uso na indústria da Construção Civil

O emprego irrestrito do resíduo na construção civil demanda grande cautela uma vez que ele possui elevado teor de MgO, CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, compostos químicos sujeitos a expansibilidade, e de álcalis, que favorecem o desenvolvimento de eflorescências e a ocorrência das reações álcali-agregado e álcali-sílica. Todavia, o número de estudos que tratam dos riscos potenciais do uso desse resíduo se mostra ainda bastante aquém, o que motivou a realização deste estudo e a definição do programa experimental.

Para materiais cerâmicos, Scribot et al. <sup>(21)</sup> recomendaram que a substituição das matérias primas pelo resíduo fosse inferior a 20% em massa devido ao risco de ocorrência de eflorescências. Eles destacam que com pequenas alterações no sistema produtivo seria possível viabilizar a sua utilização em escala industrial (Figura 3).

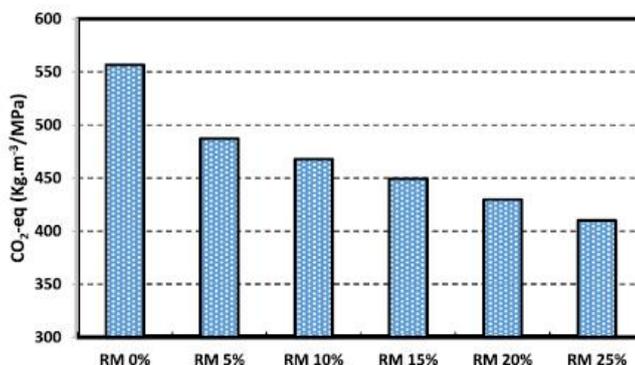


Figura 3: Aplicação em materiais cerâmicos (Fonte: Scribot et al. (2013)).



Para materiais cimentícios, Nikbin et al. <sup>(22)</sup> destaca o potencial de redução na emissão de CO<sub>2</sub> pela substituição do cimento pelo resíduo conforme apresentado na Figura 4. Todavia, existe um limite para essa substituição, pois a redução de cimento se reflete na diminuição do teor de portlandita, tornando a matriz cimentícia mais sujeita à carbonatação. <sup>(23)</sup> Em geral, o teor limite se situa entre 15 e 40% na literatura <sup>(24, 25, 26, 27)</sup>. Além da redução do pH, a sua composição química favorece a ocorrência de reações de expansibilidade, assunto muito pouco tratado na literatura. Ribeiro et al. <sup>(28)</sup> utilizaram a lama vermelha como adição ao cimento e observaram que, ao contrário do que se esperava, foram obtidas reações de expansibilidade, para argamassas com até 30% de teor de lama vermelha, inferiores aos das argamassas de referência.

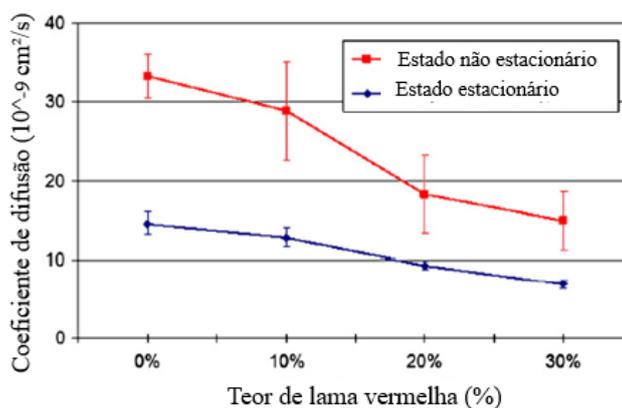
Figura 4: Emissão de CO<sub>2</sub> em função do teor de lama vermelha (RM) (Fonte: Nikbin et al. (2013)).



Em certas situações, a composição da lama vermelha pode contribuir na durabilidade da matriz cimentícia. Ribeiro et al. <sup>(23)</sup> observaram que o alto teor de aluminatos presente no resíduo favorece a fixação de cloretos por meio da redução do coeficiente de difusividade desse íon (Figura 5), sendo interessante a sua utilização em ambientes marinhos. Outros pesquisadores também exploraram o potencial da utilização do resíduo na produção de cimentos álcali-ativados, geopolímeros e concretos coloridos <sup>(13, 29, 30)</sup>.



Figura 5: Influência da adição de lama vermelha no coeficiente de difusão de cloretos (Fonte: adaptado Ribeiro et al. (2013))<sup>(17)</sup>.



## 1.6. Objetivo

O objetivo deste artigo é avaliar o potencial de utilização da lama vermelha nos teores de 5%, 10% e 15% em massa como substituto do cimento em concreto. Esse estudo, além de possibilitar melhor compreensão da utilização da lama vermelha em matrizes cimentícias, pretende contribuir para o esforço global de proporcionar uma destinação alternativa para a mesma reduzindo os problemas ambientais relativos à sua disposição no meio ambiente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização dos materiais

#### 2.1.1 Lama Vermelha

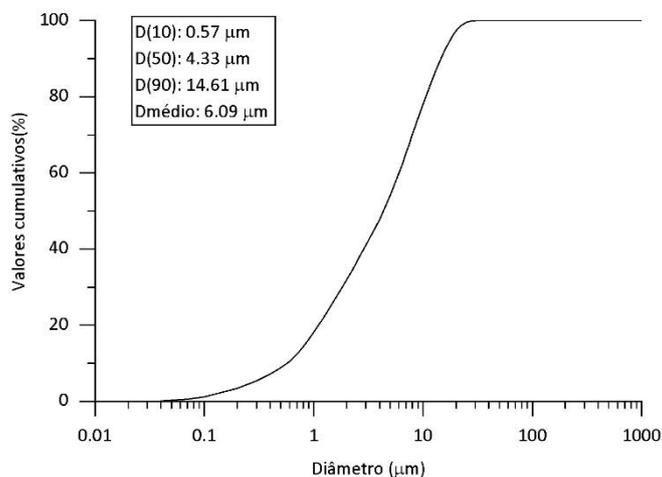
A lama vermelha utilizada neste trabalho é proveniente de uma lagoa de rejeito localizada em São Luís no estado do Maranhão. A composição química pode ser observada na Tabela 5, sendo que o resíduo empregado é majoritariamente composto por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (32,51%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (29,53%) e SiO<sub>2</sub> (17,1%) e possui sua distribuição granulométrica indicada na Figura 6, com d(10) 0,57 µm, d(50) 4,33 µm, d(90) 14,61 µm e dmédio de 6,09 µm. O ensaio de BET mostrou uma área superficial de 24,09 m<sup>2</sup>/g.

Tabela 5: Composição química da lama vermelha (Fonte: Autores) .

Óxidos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Cl	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SrO	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Teor (%)	32,51	29,56	17,1	16,64	0,66	0,4	2,05	0,1	0,36	0,3	0,13	0,1	0,04	0,02	0,021



Figura 6: Distribuição granulométrica da lama vermelha (Fonte: Autores).



### 2.1.2 Cimento

Para a confecção dos concretos foi utilizado o Cimento CP V ARI, para que seja possível verificar a real influência da lama vermelha em suas propriedades, visto que se trata de um cimento com baixo teor de adições.

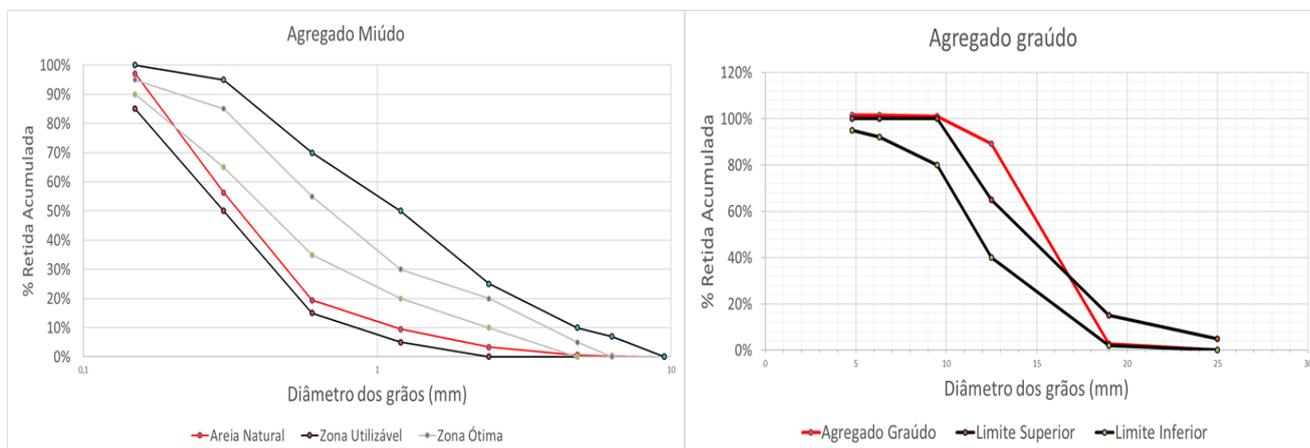
### 2.1.3 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo foi utilizada a areia quartzosa natural extraída de rio com massa específica de  $2,62\text{g/cm}^3$ , massa unitária de  $1,59\text{g/cm}^3$ . A distribuição granulométrica pode ser observada na Figura 7. A areia possui módulo de finura de 1,72 e teor de material pulverulento de 3,9%.

### 2.1.4 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi brita 1, de origem basáltica, com massa específica de  $2,94\text{g/cm}^3$  e massa unitária de  $1,63\text{g/cm}^3$ . A distribuição granulométrica do agregado graúdo pode ser observada na Figura 7.

Figura 7: Distribuição granulométrica dos agregados (Fonte: Autores (2018)).





## 2.2 Traço de concreto

A dosagem dos concretos seguiu o método de dosagem EPUSP/IPT <sup>(31)</sup>. Os traços unitários utilizados para a preparação dos concretos estão apresentados na Tabela 6. Foi adotado o teor de argamassa de 53% e utilizou-se aditivo superplastificante, com teor fixado em 0,5%, para conseguir trabalhabilidade da mistura e melhorar a dispersão do resíduo visto que ele é muito fino.

A lama vermelha foi utilizada como um substituto parcial do cimento em teores de 5%, 10% e 15% em relação a massa de cimento.

Tabela 6: Dosagem dos materiais para a produção do concreto (Fonte: Autores (2018)).

Tipo	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Lama Vermelha	Água/Aglomerante	Teor de aditivo (%)	Abatimento (mm)
REF	1,00	2,71	3,29	0,00	0,45	0,5	130
S5	0,95	2,71	3,29	0,05	0,45	0,5	100
S10	0,90	2,71	3,29	0,10	0,45	0,5	80
S15	0,85	2,71	3,29	0,15	0,45	0,5	50

## 2.3 Ensaio de expansibilidade

A utilização da lama vermelha pode gerar expansão em matrizes cimentícias devido a presença de CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e os altos teores de álcalis em sua composição química que podem desencadear em reação álcali-agregado.

Assim sendo, a expansibilidade foi medida através do método de ensaio de Le Chatelier, à quente e a frio, segundo a NBR 11582 <sup>(32)</sup> e o efeito da reação álcali-agregado foi determinado pela expansão em barras de argamassa pelo método acelerado conforme o procedimento da NBR 15577-4 <sup>(33)</sup>.

## 2.4 Ensaios no concreto endurecido

Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura em câmara úmida, com temperatura ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ) e umidade ( $95 \pm 2\%$ ) controladas até o momento do ensaio. Os concretos foram ensaiados em relação à resistência à compressão axial seguindo o procedimento da NBR 5739 <sup>(34)</sup>, nas idades de 14 e 28 dias. Também foi avaliado a resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 <sup>(35)</sup>, na idade de 28 dias.

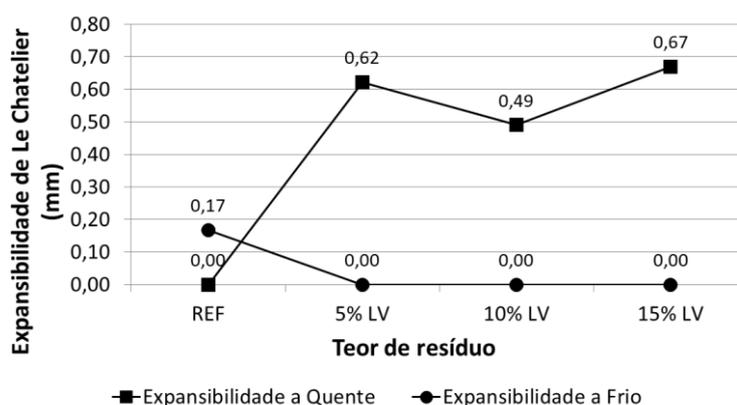


## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Expansibilidade de Le Chatelier em pastas

Na Figura 8, é possível observar os resultados do ensaio de expansibilidade a quente e a frio. No ensaio a quente, que avalia a expansibilidade devido a presença de MgO livre, observou-se um aumento da expansibilidade com a incorporação da lama vermelha. Já no ensaio a frio, que mede a expansibilidade devido a presença de CaO, observou-se que houve a redução da expansibilidade possivelmente pela redução do teor de óxido de cálcio na mistura devido a substituição do cimento pela lama vermelha.

Figura 8: Expansibilidade de Le Chatelier (Fonte: Autores (2018)).

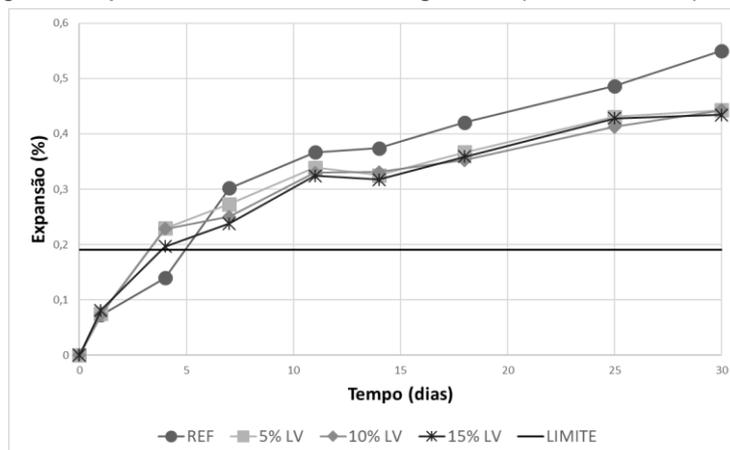


### 3.2 Expansibilidade em barras de argamassa

Os resultados do ensaio de expansibilidade em barras de argamassa para verificar a possível expansão pela ação dos álcalis presentes na lama vermelha podem ser observados na Figura 9 sendo 0,55% para o concreto de referência, 0,44% para o concreto com 5% e 10% de lama vermelha e de 0,43% para o concreto com 15%. A utilização da lama vermelha em todos os teores proporcionou uma expansão aos 30 dias de ensaio menor do que a argamassa de referência podendo então observar que sua utilização pode trazer benefícios. De forma geral, o comportamento de todas as barras apresentou nível de expansão bem superior ao que recomenda a NBR 15577-1<sup>(36)</sup> para ser considerado inócuo. As argamassas apresentaram expansão entre 0,4% e 0,6% e podem ser classificadas como potencialmente reativas de grau 2, portanto sua utilização deve ser feita com parcimônia.



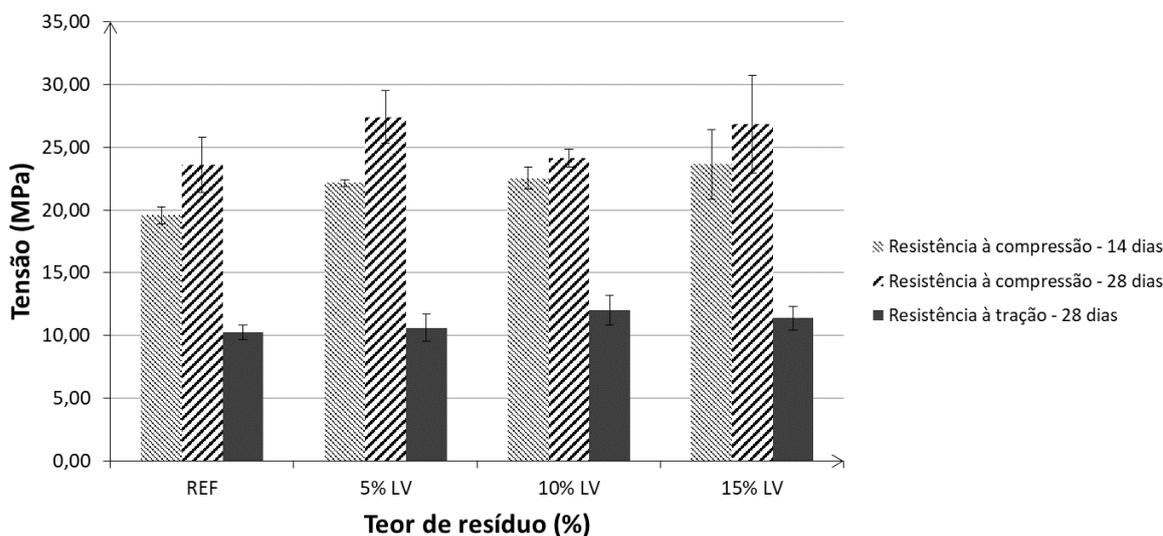
Figura 9: Expansibilidade em barras de argamassa (Fonte: Autores (2018)).



### 3.3 Resistência mecânica

Os concretos produzidos com lama vermelha foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 14 e 28 dias e de resistência à tração por compressão diametral também aos 28 dias. Os resultados estão apresentados na Figura 10. Foi observado um aumento na resistência à compressão de 16%, 2% e 14% para os percentuais de substituição de 5%, 10 e 15% respectivamente. Tal comportamento deve-se ao preenchimento de poros pela lama vermelha, que atua na densificação da matriz, além de suas partículas agirem como ponto de nucleação devido a sua elevada finura. Já para a resistência à tração por compressão diametral foram observados aumentos de resistência na ordem de 4%, 17% e 11% para os teores de substituição de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Este pequeno aumento pode estar relacionado ao aumento da resistência à compressão. Analisando estatisticamente a um nível de confiabilidade de 95% observou-se que não houve diferença significativa entre os grupos.

Figura 10: Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral (Fonte: Autores (2018)).

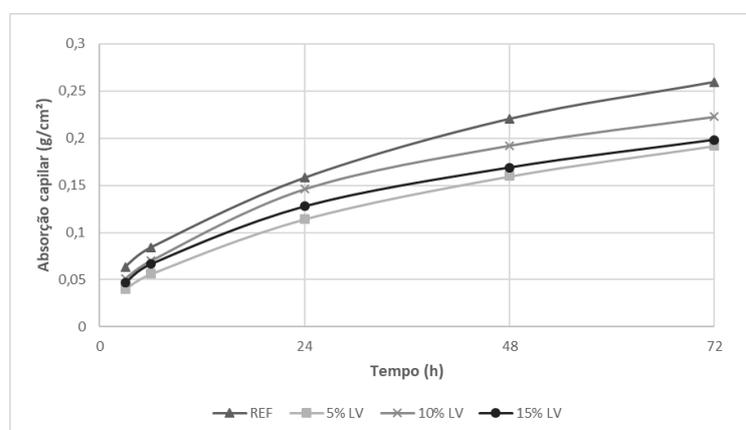




### 3.4 Absorção por capilaridade

Após os 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, secos em estufa até constância de massa e então submetidos ao ensaio de absorção por capilaridade, os resultados podem ser observados na Figura 11. Os concretos com lama vermelha apresentaram respectivamente redução de 37%, 18% e 30% na absorção, após 72h de ensaio, quando comparados ao concreto de referência. Devido a lama vermelha ser muito fina ela atua preenchendo os poros e densificando a matriz, este resultado corrobora com os obtidos nos ensaios de resistência à compressão e tração, que indicaram o aumento da resistência.

Figura 11: Absorção por capilaridade (Fonte: Autores (2018)).



## 4 CONCLUSÕES

A lama vermelha é responsável por um grande dano ambiental, tanto em seu armazenamento como em possíveis desastres ambientais, sua utilização na construção civil é uma boa forma de dar um destino adequado além de poder encapsular o material em uma matriz cimentícia. A utilização da lama vermelha como substituta parcial do cimento em até 15% se mostrou eficiente, uma vez que apresentou ganho de resistência de 14% em relação ao concreto de referência e apresentou absorção de água 30% menor, além disso proporcionou menor consumo de cimento no concreto. Quanto à expansibilidade, as pastas produzidas com a lama vermelha apresentaram expansão superior a pasta de referência na avaliação a quente. Já na avaliação frio a expansão foi maior nas pastas contendo a lama vermelha. O uso lama vermelha deve ser feita com parcimônia visto que devido a sua composição química ela pode provocar reações expansivas em determinadas circunstâncias.

## 5 AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela estrutura física e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão pela doação da Lama vermelha utilizada neste estudo.



## 6 BIBLIOGRAFIA

- (1) SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. "Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas". Revista Matéria, vol. 12, pp. 322-338, 2007.
- (2) Aluminium World. "Bauxite Residue Management: Best Practice". European Aluminium, 2015.
- (3) CORRÊA, M.; RAIMUNDO A. "Alumínio". DNPM, 2008. pp. 179-197.
- (4) Departamento Nacional de Produção Mineral. "Sumário Mineral". DNPM, 2016. Brasília. ISSN 0101-2053.
- (5) SUCHARITA PATEL, B.K. P. "Current Status of an Industrial Waste: Red Mud an Overview". IJLTEMAS, vol. 4, pp. 1-16, 2015. ISSN 2278 - 2540.
- (6) POWER, G.; GRÄFE, M. E.; KLAUBER, C. "Bauxite residue issues: Current management, disposal and storage practices". Hydrometallurgy, vol. 108, pp. 33-45, 2011.
- (7) PEREIRA BABISK, M.; CAMPOS D. G. Incorporação de Lama Vermelha em cerâmica vermelha. Tese de D.s.c, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- (8) Hazardous Waste. EPA, <https://www.epa.gov/hw/special-wastes>. Acessado em setembro de 2018.
- (9) GROCCOTT, S. C.; HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K. "The surface chemistry of Bayer process solids: a review". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 146, pp. 359-374, 1999.
- (10) RIVAS MERCURY, J.M., ET AL. "Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha". Revista Matéria, vol. 15, pp. 445 - 460, 2010.
- (11) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 10004. Resíduos Sólidos - Classificação". Rio de Janeiro, 2004.
- (12) MANFROI, E. P. Avaliação da Lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- (13) PERA, J., BOUZAMA, R., AMBROISE, J. P., "Development of a pozzolanic pigment from red mud", Cement and Concrete Research, v. 27, n.10, pp. 1513-1522, 1997.
- (14) LIU, R., POON, C., "Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete", Journal of Cleaner Production, v. 112, pp. 384-391, 2016.
- (15) BAYAT, A., HASSANI, A., YOUSEFI, A. A., "Effects of red mud on the properties of fresh and hardened alkali-activated slag paste and mortar", Construction and Building Materials, v. 167, pp. 775-790, Feb. 2018.
- (16) DE MEDEIROS, M. A., "Efeito da substituição parcial do cimento Portland por resíduo de bauxita na resistência mecânica dos concretos", Monografia, Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de ciência, Tecnologia e educação do Maranhão, IFMA, 2015.
- (17) RIBEIRO, D. V., SILVA, A. M. S., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Rheological properties and hydration behavior of Portland cement mortars containing calcined red mud", Canadian Journal of Civil Engineer, v. 40, pp. 557-566, Apr. 2013.
- (18) HE, J., JIE, Y., ZHANG, J., YU, Y., ZHANG, G., "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites", Cement and Concrete Research, v. 37, pp. 108-118, 2013.
- (19) HYEOK-JUNG, K., KANG, S., CHOE, G., "Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali- Activated Slag Cement", International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 90, pp. 137-143, Feb. 2018.
- (20) ISO 10500. Drinking Water Specifications, Bureau of Indian Standard, 2012.
- (21) SCRIBOT, C., MAHERZI, W., BENZERZOUR, M., MAMINDY-PAJANY, Y., ABRIAK, N. E., "A laboratory-scale experimental investigation on the rese of a modified red mud in ceramic materials production", Construction and Building Materials, v. 163, pp. 21-31, Dec. 2017.



- (22) NIKBIN, I. M., ALIAGHAZADEH, M., CHARKHTAB, S., FATHOLLAHPOUR, A., "Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud)", *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 2683-2694, Nov. 2017.
- (23) RIBEIRO, D. V., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, v. 42, pp. 124-133, Sept. 2012.
- (24) SENFF, L., MODOLO, R. C. E., SANTOS SILVA, A., FERREIRA, V. M., HOTZA, D., LABRINCHA, J. A., "Influence of red mud addition on rheological behavior and hardened properties of mortars", *Construction and Building Materials*, v. 65, pp. 84-91, Apr. 2014.
- (25) TANG, W. C., WANG, Z., LIU, Y., CUI, H. Z., "Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, v. 178, pp. 288-300, May. 2018.
- (26) RIBEIRO, D. V., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement", *Construction and Building Materials*, v. 14, pp. 60-66, Dec. 2010.
- (27) NIKBIN, I. M., ALIAGHAZADEH, M., CHARKHTAB, S., FATHOLLAHPOUR, A., "Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud)", *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 2683-2694, Nov. 2017.
- (28) RIBEIRO, D. V., SILVA, A. M. S., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Estudo das reações álcalis-silica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento", *Cerâmica*, v. 58, pp. 90-98, 2012.
- (29) HE, J., ZHANG, J., YU, Y., ZHANG, G., "The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study", *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 80-91, 2012.
- (30) KRIVENKO, P., KOVALCHUK, O., PASKO, A., CROYMANS, T., HULT, M., LUTTER, G., VANDEVENNE, N., SCHREURS, S., SCHROEYERS, W., "Development of an alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud", *Construction and Building Materials*, v. 151, pp. 819-826, Jun. 2017.
- (31) HELENE, P., TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. 1 ed. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.
- (32) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 11582. Cimento Portland — Determinação da expansibilidade de Le Chatelier". Rio de Janeiro, 2016.
- (33) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 15577-4. Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado". Rio de Janeiro, 2018.
- (34) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 5739. Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos". Rio de Janeiro, 2018.
- (35) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 7222. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos". Rio de Janeiro, 2011.
- (36) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 15577-1. Agregados — Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto". Rio de Janeiro, 2018.
- (37) ZHANG, J., LIU, S., YAO, Z., WU, S., JIANG, H., LIANG, M. QIAO, Y., "Environmental aspects and pavement of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, v. 180, pp. 605-613, May. 2018.
- (38) LIU, X., ZHANG, N., SUN, H., ZHANG, J., LI, L., "Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue – Red mud", *Cement and Concrete Research*, v. 41, pp. 847-853, Apr. 2011.



# CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOLONHA VISANDO SEU REAPROVEITAMENTO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Isabella Parrião de Freitas Milhomem Fernandes <sup>(1)</sup>; João Victor Rodrigues Soares <sup>(2)</sup>; Waléria Carvalho Wanzeler <sup>(3)</sup>; Wallyson Santos Martins <sup>(4)</sup>; Bruna Baia da Cunha <sup>(5)</sup>

(1) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [bellaparriao@gmail.com](mailto:bellaparriao@gmail.com); (2) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [jovirsoares@gmail.com](mailto:jovirsoares@gmail.com); (3) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [waleriacwanzeler@gmail.com](mailto:waleriacwanzeler@gmail.com); (4) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [wallysonsmartins@gmail.com](mailto:wallysonsmartins@gmail.com); (5) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [brunabcunha@ufpa.br](mailto:brunabcunha@ufpa.br)

## RESUMO

As Estações de Tratamento de Água geram um resíduo denominado de lodo de ETA ou resíduo de ETA (RETA). A maioria das ETA's lançam irregularmente estes resíduos diretamente nos corpos hídricos causando sérios prejuízos ao meio ambiente. Atualmente os órgãos ambientais estão exigindo que a fonte geradora defina alternativas de disposição sustentável para esses resíduos. O presente trabalho tem objetivo de caracterizar o lodo da ETA Bolonha, localizada em Belém-PA, com a finalidade de buscar alternativas sustentáveis para o seu reaproveitamento na cadeia produtiva de materiais de construção. Para isso foram realizados ensaios de análise mineralógica por difração de raio X (DRX), análise química por fluorescência de raio X (FRX) e análise termogravimétrica com perda ao fogo. Os resultados encontrados nas análises do resíduo do Lodo da ETA Bolonha demonstram a potencialidade de seu reaproveitamento como material de construção.

**Palavras-chave:** reaproveitamento de resíduo, resíduo caulinitico, resíduo de ETA.

## CHARACTERIZATION OF WATER TREATMENT STATION BOLOGNA AIMING AT YOUR REHABILITATION IN CONSTRUCTION MATERIALS

### ABSTRACT

Water Treatment Plants generate a residue called ETA sludge or ETA residue (RETA). Most ETAs irregularly release this waste directly into the water bodies causing serious damage to the environment. Currently, environmental agencies are demanding that the generating source define sustainable disposal alternatives for these wastes. The present work has the objective of characterizing sludge from ETA Bologna, located in Belém-PA, in order to find sustainable alternatives for its reuse in the production chain of construction materials. In order to do so, it was carried out tests of mineralogical analysis by X-ray diffraction (XRD), chemical analysis by X-ray fluorescence (FRX) and thermogravimetric analysis with fire loss. The results found in the analyzes of the residue of ETA Sludge Bologna demonstrate the potential of its reuse as a building material.

**Key-words:** reuse of waste, caulinotic residue, ETA residue.



## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento das populações nas cidades, cada vez mais tem se exigido o abastecimento de água com qualidade. As estações de tratamento de água (ETA's) têm o papel fundamental para conseguir essa qualidade, com características físico-químico e biológicas em concordância com os padrões de potabilidades exigido pela Portaria 518 do Ministério da Saúde (CORDEIRO, 1993)<sup>(1)</sup>.

No sistema de tratamento da água de ciclo completo ocorrem os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, cloração e fluoretação. Para a retirada das impurezas contida na água bruta, são utilizados produtos químicos, ficando grande parte acumulado nos decantadores, e o restante nos filtros (SOUZA *et al.*, 2004)<sup>(2)</sup>. Após um período de funcionamento, essas unidades devem ser lavadas para a retirada do acúmulo das impurezas.

Neste sistema, obtém-se água potável como produto final, e um subproduto é gerado na lavagem das unidades: o lodo de ETA, com grande porcentagem de umidade, que deve ser destinado adequadamente, conforme legislações vigentes (BARBOSA, 2000)<sup>(3)</sup>. Entretanto, no país, quase todas as ETA's não possuem qualquer forma de tratamento para esses resíduos, pois desconhecem ou ignoram a quantidade gerada em uma ETA (SOUZA *et al.*, 2004)<sup>(4)</sup>. Na maioria eles são lançados em corpos d'água, causando efeitos ao meio e não cumprindo as legislações ambientais.

No Brasil, segundo Agostini *et al.* (2014)<sup>(5)</sup>, a maior parte de lodo de ETA é disposta em cursos d'água. Moreira *et al.* (2009)<sup>(6)</sup>, citado por Araújo (2017), relata que em termos de mensuração da produção do RETA e de seu descarte, estimam que, no Brasil, sejam despejadas 2.000 m<sup>3</sup>/dia de RETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento.

De, aproximadamente, 7.500 ETA's no país, 70% destas lançam lodo nos rios, portanto os estudos sobre avaliação de tratamento e reaproveitamento do lodo e suas potencialidades são de fundamental importância para que a prática de disposição inadequada do lodo seja evitada, garantindo o gerenciamento dos resíduos de maneira apropriada, sem danos ambientais.

De acordo com Achon (2008)<sup>(7)</sup>, Andrade (2014)<sup>(8)</sup>, Katayama (2012)<sup>(9)</sup> e Ribeiro (2003)<sup>(10)</sup>, a grande maioria das ETA's brasileiras lançam o lodo nos corpos d'água sem tratamento. Por consequência, gera-se um ciclo vicioso e contraditório no qual os rios são os provedores de água para as estações de tratamento e também, são receptores dos resíduos gerados pela própria ETA.

As características quali-quantitativas do lodo gerado podem variar conforme o gerenciamento do processo de tratamento, métodos de operação do sistema, periodicidade de limpeza dos



decantadores e filtros e da dosagem de produtos químicos que é função da variação temporal das características físico-químicas da água de captação, a qual está associada à formação geológica onde o manancial está inserido, ao uso e a ocupação do solo da área da bacia hidrográfica e ao ciclo hidrológico característico regional.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A ETA destacada neste estudo é a Estação de Tratamento de Água do Bolonha (ETA Bolonha), situada na Avenida João Paulo II, em Belém do Pará. As captações do sistema produtor integrado Bolonha - Utinga estão localizadas no Lago Bolonha (interligado ao Lago Água Preta, alimentado pelo rio Guamá). A Figura 1 apresenta uma vista panorâmica da Estação de Tratamento de Água do Bolonha. Essa ETA é administrada pela Companhia de Saneamento do Estado do Pará (COSANPA), apresenta tratamento de ciclo convencional com capacidade de vazão média de 6,4 m<sup>3</sup>/s e abastece cerca de 70% da Região Metropolitana de Belém (RMB). Cinco municípios compõem a região metropolitana: a capital Belém, Ananindeua, Benevides, Marituba e Santa Bárbara, concentrando cerca de 1/3 da população estadual (COSANPA, 2013)<sup>(11)</sup>.

Figura 1 - Estação de Tratamento de Água Bolonha.



Aproximadamente 200 litros de lodo foram coletados do tanque de decantação da ETA Bolonha nos meses de novembro e dezembro de 2018. As coletas foram realizadas nos dias programados para ocorrerem a limpeza dos decantadores e filtros, vale ressaltar que os tanques eram previamente esvaziados, restando apenas o resíduo em seu interior. Posteriormente os resíduos foram



encaminhados ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram armazenados em recipientes plásticos, para serem utilizados neste estudo.

A amostra do resíduo natural (bruto) apresenta-se na forma de lodo. O resíduo foi então homogeneizado e submetido a um processo de secagem em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 72 horas para obtenção de constância da massa, e, posteriormente, submetido a um moinho de bolas horizontal durante 8 horas, no LEMAC do Laboratório de Engenharia Civil, do qual foi retirado com aspecto de pó. Foi empregado a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg de lodo, sendo 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, segundo a metodologia empregada por Pouey (2006)<sup>(12)</sup>. Em seguida o resíduo seco foi destorroado e peneirado na peneira de fração 0,075mm, constituindo-se a amostra de trabalho.

Foi realizada a caracterização físico-química, mineralógica e térmica do resíduo do lodo proveniente da ETA Bolonha, tendo como proposta avaliar seu potencial de utilização em materiais de construção civil, neste sentido, a utilização do lodo para este fim pode ser uma das alternativas para a correta destinação e reaproveitamento do resíduo, sendo este o objeto principal deste estudo.

## 2.1. Composição Granulométrica à Laser

A caracterização da composição granulométrica, que tem por objetivo determinar a curva granulométrica e definir o diâmetro médio das partículas do lodo estudado, foi executada através do ensaio de Granulometria à Laser, realizado no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações (LAMIGA) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

A granulometria da amostra foi realizada por difração à laser com auxílio do Granulômetro Fritsch, modelo Analysette 22 (MicroTec plus), que possui duas unidades de dispersão, uma trabalha a seco (Dry Dispersion Unit) e a outra trabalha com dispersão em água (Wet Dispersion Unit), a qual será utilizada.

Inicialmente foi colocado 5 gramas da amostra em um pote de polietileno, em seguida adicionou-se água destilada para auxiliar na desfloculação e então foi levada à análise, optou-se em não usar 0,9 g/L do dispersante (pirofosfato de sódio), uma vez que o mesmo é recomendado para argila e não se sabe exatamente o que ele pode causar na amostra em questão.

A aquisição e análise dos dados da distribuição granulométrica da amostra do resíduo do lodo foi feita com o software MaScontrol, Fritsch GmbH, versão 0.6.0.77.



## 2.2. Fluorescência de Raio X (FRX)

Quimicamente, foi verificado a concentração de óxidos pela análise da espectrometria de fluorescência de raio X, regida pela NBR 16137 (ABNT, 2016)<sup>(13)</sup>. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), na Universidade Federal do Paraná (UFPR), através do envio de uma amostra do lodo da ETA Bolonha previamente seca em estufa a  $(105 \pm 5)$  °C, moída e passada na peneira de abertura 0,075 mm.

Segundo procedimentos do LAMIR, a composição química do lodo foi determinada em espectrômetro de fluorescência de raio X, modelo Axios Max, da marca PANalytical. O software utilizado para a interpretação dos dados foi a versão de modelo SuperQ51. O método utilizado para determinação semi-quantitativa foi de parâmetros fundamentais (FP). O procedimento de preparação da amostra foi o de pastilha prensada, amostra e cera orgânica, ensaio de perda ao fogo a 1000 °C e varredura química.

Caso os índices de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  atendam às exigências químicas presentes na norma NBR 12653, e com os resultados positivos referente ao ensaio para verificação da pozolanicidade, o material poderá ser considerado potencialmente pozolânico.

## 2.3. Difração de Raios X (DRX)

A caracterização mineralógica foi ensaiada pela análise de difração de raios X, realizada no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará, por meio de difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar a composição do lodo, principalmente quanto à forma com que se apresenta, seja ela amorfa ou cristalina. Para a análise de DRX, o material foi quarteado e parte do pó analisado, os argilominerais foram identificados por comparação das distâncias interplanares.

As análises foram realizadas em difratômetro modelo D8 Advance da Bruker com geometria BraggBrentano e detector LynxEye, com tubo de raios-x de Cu com radiação Cu ( $K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$ ), voltagem e corrente do tubo de, respectivamente, 40 kV e 40 mA. A coleta dos difratogramas foi realizada com faixa angular ( $2\theta$ ) = 5 a 75°. Voltagem do tubo = 40 kV. Fenda do tipo divergente com 0,6mm, Soller com 2,5° e filtro  $K\beta$  de Ni. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0,2s, com tempo total da coleta de 714,4s. A aquisição dos dados foi feita com o software DIFFRAC.COMMANDER, versão 2.2b, e o tratamento dos dados com o software X'PertHighScore Plus versão 2.2b, também da PANalytical.



Esta análise auxilia na identificação da estrutura cristalina do material, indicando sua fase mineralógica a partir de comparações entre os difratogramas obtidos do material com difratogramas de banco de dados internacionais. A análise possibilita indicar a reatividade química do material, caso apresente-se cristalino, possui baixa atividade, e quando amorfo, maior potencialidade do material a ser aplicado como pozolana.

## **2.4. Análise Termogravimétrica**

A análise termogravimétrica (ATG) e a termogravimétrica derivada (DTG) foram realizadas no Laboratório de Óleos da Amazônia (LOA) do Parque de Ciência e Tecnologia Guamá da UFPA.

O ensaio foi operado sob taxa de aquecimento 10°C/min, no intervalo entre a temperatura ambiente a 1000°C, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min, no equipamento de análise térmica simultânea (STA) marca Shimadzu, modelo TDG – 60H, em cadinho aberto de alumina.

O software utilizado para o tratamento dos dados foi o TA Acquisition, Status – TA – 60Ch.2.DTG – 60H. Para o ensaio utilizou-se a massa inicial de aproximadamente 5 mg de lodo previamente seco e pulverizado.

Na análise termogravimétrica (TGA), as curvas permitem determinar a temperatura de decomposição e taxa de decomposição em função da temperatura do RETA. As curvas de TGA podem e devem ser derivadas registrando-se a termogravimetria derivada (DTG) que fornece informações da derivada primeira da variação da massa em relação ao tempo (dm/dt) ou em função da temperatura (dm/dT).

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1. Caracterização Física**

#### **3.1.1. Granulometria à Laser**

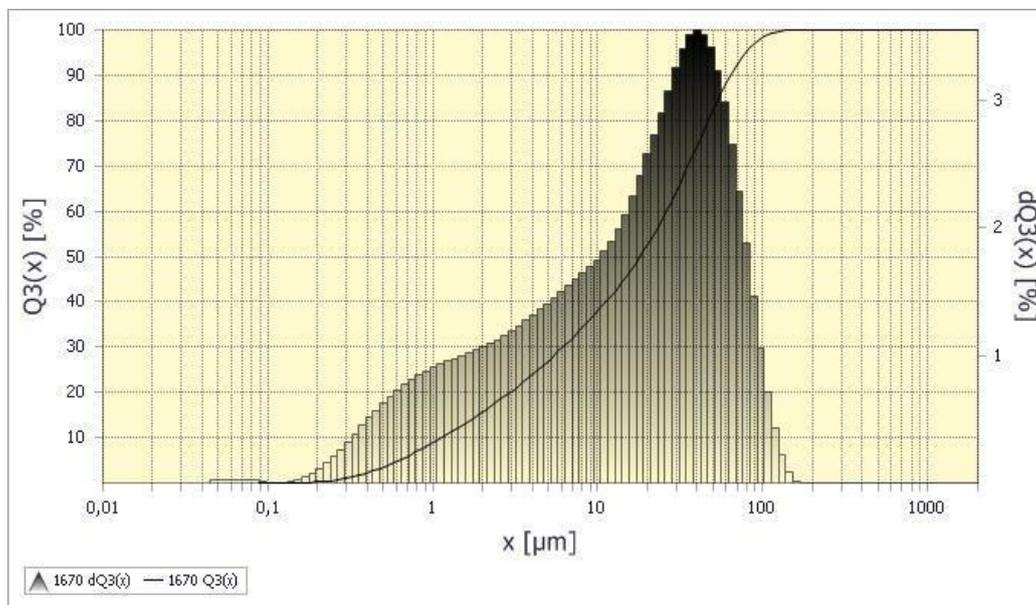
Na Figura 2, é possível verificar a curva de distribuição granulométrica da amostra do resíduo de lodo de ETA Bolonha.

A curva granulométrica do lodo contendo os diâmetros das suas partículas em função da porcentagem acumulada passante indica que D10 corresponde a 1,1µm, D50 a 14,8µm e D90 a 61,3µm. Os resultados indicam que o diâmetro do lodo se aproxima ao do cimento, que varia entre



10 e 15 $\mu\text{m}$  (NEVILLE, 1997)<sup>(14)</sup>, indicando que ele não poderia ser utilizado como filer, pois o material precisa ter granulometria inferior ao cimento.

Figura 2 - Análise de granulometria à laser da amostra do RETA Bolonha.



## 3.2. Caracterização Química

### 3.2.1. Fluorescência de Raio X (FRX)

A constituição química elementar do RETA é apresentada na Tabela 1. Os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo da ETA Bolonha são discutidos na sequência.

Verificou-se perda ao fogo do lodo da ordem de 29,90% para a amostra. Esta perda ao fogo, deve-se potencialmente, à presença de águas intersticiais, hidroxilas dos argilominerais e dos hidróxidos existentes. Também, podem ter sido originados da volatilização de componentes da matéria orgânica.

A somatória dos óxidos  $\text{SiO}_2$  (27,9%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (24,7%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (13,5%) na matriz correspondeu a cerca de 66,1% dos componentes químicos totais, os valores estão próximos ao encontrado por Ramirez (2015)<sup>(15)</sup>, que em sua primeira coleta obteve para os mesmos óxidos 65%. O autor afirma que estas concentrações, principalmente de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são esperadas devido à própria composição do material sedimentado no tratamento de água e do coagulante utilizado no processo de tratamento, que reflete diretamente na composição majoritária de Al.



Através da caracterização química infere-se que o lodo não pode ser classificado como adição mineral pozolânica, uma vez que a somatória de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  e a perda ao fogo não atendem as exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 2014)<sup>(16)</sup>. A amostra não atendeu a somatória para classes N e C que solicita o mínimo de 70%, atendeu a somatória dos óxidos para a classe E de 50%, porém a perda ao fogo foi superior a exigida na norma que é de 10% para classe N e 6% para classes C e E.

Tabela 1 - Análise química por Fluorescência de Raio X (FRX).

Resíduo do lodo	
Composição Química	% massa
$\text{SiO}_2$	27,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24,7
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	13,5
$\text{K}_2\text{O}$	0,9
$\text{MgO}$	0,6
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,6
$\text{TiO}_2$	0,6
$\text{SO}_3$	0,5
$\text{CaO}$	0,3
Perda ao fogo (P.F.)	29,90

### 3.3. Caracterização Mineralógica

#### 3.3.1. Difração de Raios X (DRX)

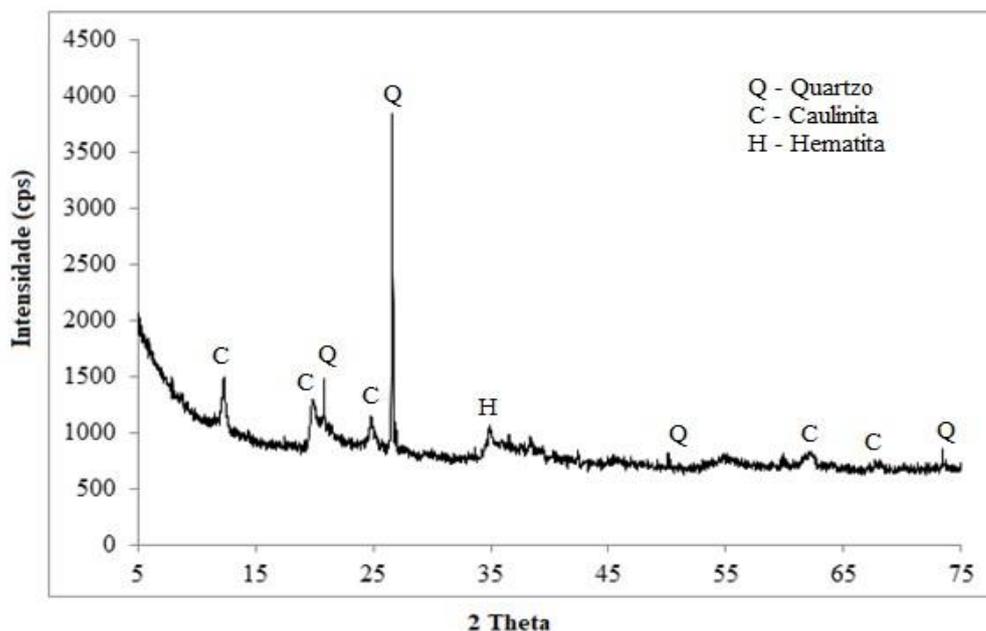
Na Figura 3 observa-se o difratograma do RETA, um gráfico do ângulo de espalhamento ( $2\theta$ ) em função da intensidade dos picos de incidência, que indicam a presença predominante de alguns minerais na amostra, são eles: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sendo esses resultados similares aos encontrados por Tartari *et al.* (2011)<sup>(17)</sup>.

Pela análise mineralógica pode-se dizer que o lodo da ETA Bolonha é um material cristalino, uma vez que sua estrutura apresenta picos característicos de fase cristalina. Em seu estudo, Pinheiro, Estevão e Souza (2014)<sup>(18)</sup> também encontraram predominância de fase cristalina em sua amostra, sendo observados os seguintes picos de difração: caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) como um dos principais constituintes mineralógicos encontrados no lodo de ETA e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).



Os elementos encontrados na amostra em maior quantidade, são o silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), também determinados pela análise de fluorescência de raio X. A presença desses elementos pode ser justificada pelo uso do coagulante de sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo a areia e materiais argilosos. (PORTELLA et al, 2003)<sup>(19)</sup>.

Figura 3 - Difratoograma do resíduo de lodo da ETA Bolonha (DRX).



### 3.4. Caracterização Térmica

#### 3.4.1. Análise Termogravimétrica

Para a análise da amostra de RETA, foi possível evidenciar quatro eventos térmicos, conforme apresentado na Figura 4. A Tabela 2 apresenta o comportamento térmico (ATD/TG) do resíduo de ETA Bolonha, bem como seus eventos térmicos e seus respectivos parâmetros.

Inicialmente observa-se um pico endotérmico, neste primeiro evento a temperatura variou de 43,58°C a 105,24°C, com perda de massa 6,836% correspondente a 0,598 mg. Esta perda está associada à saída de água adsorvida.

A segunda etapa ocorreu com temperatura entre 298,48°C e 363,17°C relativo a picos exotérmicos. Tem-se então a maior perda de massa na ordem de 16,907% o que corresponde a 1,479 mg. Esta perda está relacionada a desidroxilação de hidróxido e/ou a decomposição de matéria orgânica.

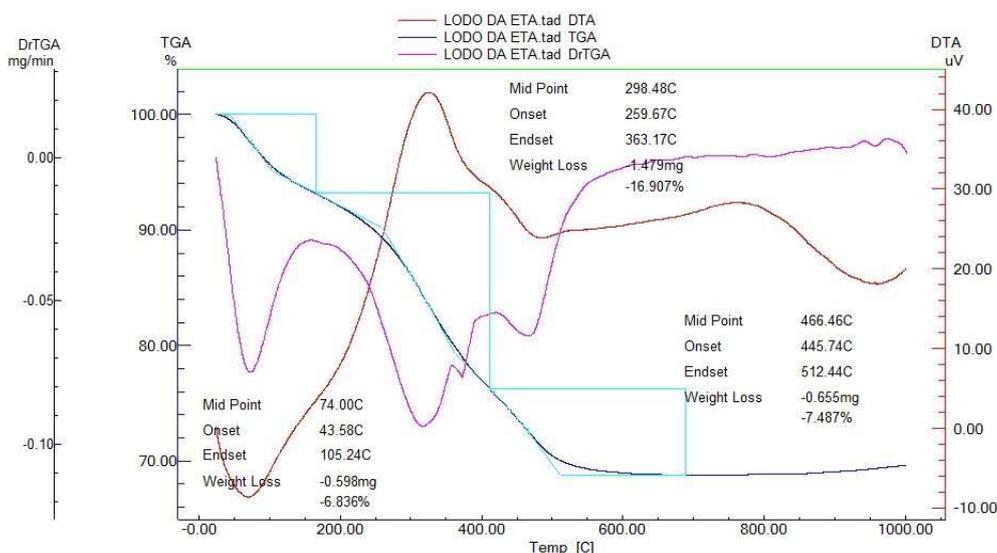


No terceiro evento, caracterizado por picos endotérmicos, a temperatura variou de 466,46°C a 512,44°C, onde foi observado uma perda de massa de 7,487% equivalente a 0,655 mg. Esta perda está relacionada à perda de hidroxilas, característico da desidroxilação da caulinita.

O quarto e último pico observado foi exotérmico, com uma temperatura entre 909°C e 925°C. A perda de massa foi constante e próxima a zero. Este pico pode ser devido à quebra da estrutura da metacaulinita para a formação de novas fases cristalinas tais como  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  e/ou mulita primária (SANTOS, 1989)<sup>(20)</sup>.

Conforme observado nesta figura, a perda de massa total da amostra referente ao lodo da ETA Bolonha foi de 31,23%. Ao fazer um comparativo com a literatura, Silva e Fungaro (2011)<sup>(21)</sup> obtiveram perda em torno de 32% à temperatura de 906°C para o lodo de ETA de Terra Presta em São Paulo. Esta perda foi relacionada devido à eliminação de água adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica (SANTOS, 1997)<sup>(22)</sup>.

**Figura 4 - Análise Térmica do lodo da ETA.**



**Tabela 2 - Análise térmica do lodo.**

Parâmetros	Evento			
	Saída de Água Adsorvida	Desidroxilação de hidróxido e decomposição de matéria orgânica	Desidroxilação da caulinita	Formação de espinélios mulita
T (°C)	105,24	363,17	512,44	910
Perda de massa (%)	6,836	16,907	7,487	-



## 4. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que o lodo da ETA Bolonha se mostrou um material essencialmente fino, com diâmetro médio de 14,8µm e composto, em sua maioria, por matéria orgânica. Porém, é inviável a substituição parcial ao cimento, uma vez que o material deveria apresentar diâmetro inferior.

A composição química majoritária das matérias-primas do RETA é formada por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , entretanto em percentuais diferenciados, com 27,9%, 24,7% e 13,5%, respectivamente. Pode-se inferir que os resultados da análise de fluorescência de raio X indicam que sua reatividade não foi suficiente para atender aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma referente a materiais pozolânicos.

Através da realização da análise mineralógica pelo difratograma do RETA (DRX), observou-se picos de difração, que indicam a presença predominante de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). O que permite concluir que o lodo da ETA Bolonha é um material cristalino, uma vez que sua estrutura apresenta picos característicos de fase cristalina.

A análise térmica sugere inclusão de uma etapa de calcinação prévia do lodo da ETA à uma temperatura de 500, 600, 700 e 800 °C, o que deverá eliminar a matéria orgânica presente na amostra e tornando-o um material mais reativo, transformando a caulinita em metacaulinita, material essencialmente pozolânico, essa medida economizaria cimento na argamassa que atualmente é produzido de 1350 a 1400 °C;

Considerando a enorme quantidade de resíduos provenientes do tratamento de águas residuais na região metropolitana de Belém e o excedente despejado no meio ambiente, é importante a continuação e disseminação do conhecimento sobre a utilização do lodo gerado por esse processo produtivo, cujo objetivo é buscar alternativas de aplicabilidade e interação deste resíduo na indústria da construção civil.



## **5. REFERÊNCIAS**

1. CORDEIRO, J.S. **O problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de águas**. Tese (Doutorado em Escola de Engenharia de São Carlos) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
2. SOUZA, F. G. C.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Estudo comparativo da geração de sólidos em estação de tratamento de água convencional de ciclo completo e ETA ciclo completo com decantador de alta taxa**. In: XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2004, San Ruan. Anais do XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2004.
3. BARBOSA, R. M. **Avaliação do impacto de efluentes (lodos) de ETA's à biótica aquática através de testes de toxicidade**. Tese (Doutorado em Escola de Engenharia de São Carlos) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
4. SOUZA, F. G. C.; CORDEIRO, J. S. **Resíduos gerados em estação de tratamento de água com descargas diárias**. In: XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2004, San Juan. Anais do XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2004.
5. AGOSTINI, M.; KULAKOWSKI, M. P.; BREHM, F. A. **A influência da pluviometria na adição de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha**. In: Anais do Fórum Nacional de Resíduos Sólidos, 5., São Leopoldo, RS, 2014.
6. MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMESSO, A. L.; LIMA, G. L. **Estudos Geoquímico da Disposição de Logo de Estação de Tratamento de Água em Área Degradada**. Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, 2085-2093, 2009.
7. ACHON, C. L. **Eco eficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001**. 2008. 248 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
8. ANDRADE, C. F.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA, F. C. **Gestão ambiental de saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas**. In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Anais. Belo Horizonte: IBEAS, p. 1-11, 2014.



9. KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: Uma análise crítica.** 144 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2014.
10. RIBEIRO, H. K. S. S. **Avaliação de desempenho ambiental em estações de tratamento de água.** 2003. 158 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, 2003.
11. COSANPA – Companhia de Saneamento do Estado do Pará. **Relatório de Informações Gerenciais 2013.** Belém, 2013.
12. POUHEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2006.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137:** Ensaio não destrutivo - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. 2016.
14. NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2<sup>a</sup> ed., São Paulo, PINI, 1997.
15. RAMIREZ, Kleber Gomes et al. **Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
17. TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MODENES, A. N.; PIANARO, S. A. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense.** Cerâmica, São Paulo, v. 57, n. 343, Sept. 2011.
18. PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVÃO, G. M.; SOUZA, D. P. **Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha Parte I: caracterização do lodo.** Revista Matéria, v. 19, n. 03, p. 204-211, 2014.
19. PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterização físicoquímica do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba.** Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. Joinville, 2003.



20. SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, v. 1, 2 ed., São Paulo, EdigardBlucher Ltda, 1989.
21. SILVA, M. V.; FUNGARO, D. A. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de água e cinzas de carvão visando sua utilização na manufatura de tijolo**. In: 3rd International Workshop Advances In Cleaner Production. São Paulo. 2011.
22. SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologias de Argilas**. 2a ed., PINI Ltda.: São Paulo, 1997, vol. 1.



## INFLUÊNCIA DAS FIBRAS RECICLADAS DE PET COMO REFORÇO DE ADOBE

**Gustavo Rodrigues Lopes Tavares <sup>(1)</sup>; Margareth da Silva Magalhães <sup>(1)</sup>**

(1) Programa de pós-graduação em Engenharia Civil (PGE CIV), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (FEN – UERJ) – gustavorltavares@gmail.com; margareth.magalhaes@uerj.br

### RESUMO

A destinação inadequada dada a derivados de plástico como o polietileno tereftalato (PET) contribui enormemente para a poluição ambiental no Brasil, uma vez que tais resíduos apresentam elevado tempo de decomposição (superior a 100 anos). Este artigo tem como objetivo verificar a influência de fibras recicladas de PET (R-PET) no desempenho do adobe, de forma a conferir uma destinação adequada a este resíduo e a melhorar algumas propriedades do adobe. Nos ensaios foram produzidas 5 diferentes misturas, com diferentes teores de argila e dois teores de fibras (0,25% e 0,50%). Foram realizados testes de compressão, flexão e retração nas amostras de adobe. Os resultados dos ensaios de compressão e flexão mostraram que a influência das fibras foi maior na mistura com maior teor de argila e 0,5% de fibras R-PET. Ocorreu aumento de resistência à compressão e incremento de tensão após fissuração da matriz e maior ductilidade sob cargas de flexão. A introdução de fibras R-PET também foi eficiente no controle da retração e fissuração durante a secagem das amostras. Contudo, a eficiência das fibras foi maior na mistura com maior teor de argila com uma redução nos valores de retração de até 48%.

**Palavras-chave:** adobe, fibras de PET reciclado, retração, propriedades mecânicas.

## INFLUENCE OF RECYCLED PET FIBERS AS REINFORCEMENT OF ADOBE

### ABSTRACT

Inadequate disposal given to plastic waste materials such as polyethylene terephthalate (PET) contributes enormously to environmental pollution in Brazil, since such waste has a low rate of biodegradation (decomposition time over 100 years). This paper aims to investigate the influence of recycled PET fibers (R-PET) on the behavior of adobe with the purpose of using adequately this waste and provides additional advantages on the adobe behavior. Five experimental adobes mixtures were manufactured with different clay contents and two R-PET fibers contents (0.25% and 0.5%) by volume of dry materials. Compressive strength, flexural and shrinkage tests were carried out on the adobe specimens. The compressive and flexural tests results indicate that effect of the R-PET fibers was more visible in the mixtures with higher clay content and 0.5% of R-PET fibers. The compressive strength was increased and the post-cracking flexural strength was improved, indicated a more ductile behavior of this mixture. The use of R-PET fibers was also efficient on the shrinkage control and cracking of adobe specimens. Shrinkage tests showed the R-PET fiber had little influence on the mixture with lower clay content and a greater influence on the mixture with a higher clay content, reaching a reduction in shrinkage of up to 48%.

**Key-words:** adobe, recycled PET fibers, shrinkage, mechanical behaviour.



## 1. INTRODUÇÃO

A destinação inadequada de resíduos sólidos no Brasil é um grave problema ambiental. Embalagens de plástico ou de derivados de plástico, como o PET (polietileno tereftalato), representam parte desses resíduos sólidos e apresentam o agravante de demorarem muito tempo para se decomporem na natureza (mais de 100 anos). Além da destinação inadequada, apenas uma parte do total de embalagens de PET é devidamente reciclada. Segundo o último censo realizado pela Associação Brasileira da Indústria do PET <sup>(1)</sup>, cerca de 51% do total de 537 mil toneladas de PET produzidas anualmente no país são reciclados, indicando que cerca de 263 mil toneladas desse resíduo ainda são descartadas no ambiente.

Faz-se necessário, por conseguinte pesquisar novos usos possíveis para o PET descartado, de modo a aumentar a porcentagem reciclada deste produto. Uma destinação possível é a utilização de fibras de PET na construção civil, como por exemplo na fabricação de adobe.

O adobe é um material de construção sustentável que consiste basicamente de terra (argila e areia) e água. Tal método de construção é muito antigo. Campbell e Pryce <sup>(2)</sup> apontam que as primeiras construções erguidas com adobe datam de cerca de 6500 anos A.C. nas regiões de Jericó, Israel, e na ilha de Chipre.

Apesar de ser um material muito antigo, a terra crua como material de construção está sendo resgatada a nível mundial. Parte do crescente interesse por esses materiais decorre do aumento da preocupação com o impacto ambiental e o alto gasto energético decorrentes da produção dos materiais convencionais, tais como, cimento, aço e blocos cerâmicos. Por exemplo, durante a queima para a produção de blocos cerâmicos, diversos compostos poluentes são emitidos na atmosfera, impactando diretamente a qualidade do ar <sup>(3, 4)</sup>. A produção de tijolos de adobe, por outro lado, uma vez que utiliza a terra crua, não emite poluentes.

O solo, no entanto, é um material frágil e que sofre grande retração durante a secagem, necessitando a incorporação de fibras para controlar a fissuração e conferir ao material maior ductilidade, o que é feito desde a antiguidade, como citado em Êxodos 5:6, onde os egípcios já usavam a palha de trigo para reforçar tijolos de barro. Apesar de a inserção de fibras no adobe ser uma técnica antiga, há pesquisas contemporâneas, inclusive brasileiras, que investigam as propriedades conferidas ao adobe após a incorporação de diversos tipos de fibras vegetais <sup>(5, 6, 7, 8, 9, 10)</sup>.



Barbosa e Ghavami <sup>(11)</sup> citam que as principais funções das fibras em materiais à base de terra são impedir e controlar a fissuração durante a secagem, distribuindo as tensões devidas à deformação por retração da mistura em toda a massa do material. Além disto, a adição de fibras em matrizes frágeis (cimentícias ou solo) também melhoram o comportamento mecânico do composto após a fissuração da matriz, dando-lhe maior ductilidade e capacidade de absorver energia e, ainda, podem incrementar a resistência à tração, dependendo do teor de fibras <sup>(12)</sup>. Isto ocorre, segundo Bentur e Mindess <sup>(13)</sup>, por que as fibras que atravessam as fissuras atuam como ponte de transferência de tensões entre as partes da matriz separadas pela fissura, de tal forma que a deformação somente aumenta após um novo acréscimo de tensão.

Nesse sentido, este artigo possui como objetivo discutir a viabilidade da inserção de fibras de PET reciclado no adobe (tijolos de terra crua) de forma a conferir uma destinação adequada ao resíduo e a melhorar algumas propriedades do adobe, como a ductilidade, resistência à flexão, absorção de água e retração.



## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais utilizados na fabricação do adobe

Os materiais utilizados na fabricação dos corpos de prova foram: solo natural, filito, água e fibras de PET recicladas (R-PET). O solo utilizado para a confecção dos corpos de prova de adobe foi coletado na região da Tijuca, zona norte do Rio de Janeiro, aos pés de uma rocha denominada Pedra da Babilônia, constituída por gnaisse. O filito é um material industrializado, da marca Pavione, de proveniência da cidade de Ipanema, Minas Gerais, Brasil.

Para a caracterização do solo e filito, foram realizados ensaios de teor de umidade, limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real dos grãos e a distribuição granulométrica. Estes ensaios tinham como objetivo verificar se o solo era adequado para a confecção de tijolos de adobe.

O teor de umidade do solo, determinado com base na norma NBR 6457 <sup>(14)</sup>, é definido como a massa da água contida em uma amostra de solo dividido pela massa de solo seco. Os limites de liquidez e plasticidade foram determinados, respectivamente, pelas normas NBR 6459 <sup>(15)</sup> e NBR 7180 <sup>(16)</sup>. O limite de liquidez indica o teor de água a partir do qual o solo adquire consistência líquida e o limite de plasticidade é o teor de água abaixo do qual o solo perde a consistência plástica. A densidade real dos grãos foi determinada como descrito na norma NBR 6458 <sup>(17)</sup> e é definida como a relação entre o peso específico do grão e o peso específico água.

Por fim, a distribuição granulométrica foi realizada de acordo com a norma NBR 7181 <sup>(18)</sup>. Este teste determina as proporções em percentual dos diferentes tamanhos das partículas do solo. Neste trabalho foi utilizada a classificação apresentada por Barbosa e Ghavami <sup>(11)</sup>, onde as partículas de solo são classificadas em: pedregulho (4,8 a 50 mm), areia (50 µm a 4,8 mm), silte (5 a 50 µm) e argila ( $\leq 5$  µm).

Os resultados dos ensaios de caracterização do solo e filito são apresentados na Figura 1 e Tabela 1. A análise da distribuição dos grãos indicou que o solo é composto de 4% de pedregulho, 75% de areia, 12% de silte e 9% de argila. Este solo tem limite de liquidez igual a 47%, limite de plasticidade de 27,65% e índice de plasticidade igual a 19,43%. A norma Australiana AS 3700 <sup>(19)</sup> estabelece que o solo ideal para estabilização com fibras tem que ter limite de liquidez entre 30% e 50% e índice de plasticidade entre 15% e 35%. Além disto, Barbosa e Ghavami <sup>(11)</sup> propõem que o solo apropriado para a fabricação do adobe tem até 10% de pedregulho, 45-75% de areia, 10-45% de silte e 15-30% de argila e o solo ideal tem 0% de pedregulho, 60% de areia, 15-20% de silte e 20-25% de argila.



Desta forma o solo original foi peneirado para eliminação das partículas maiores que 4,8 mm e misturado com filito de forma a diminuir o teor de areia e aumentar o teor de argila. Segundo a análise granulométrica, na Tabela 1, o filito é um material rico em argila, com 57% em massa.

Figura 1 - Curvas granulométricas do (a) solo natural e (b) filito.

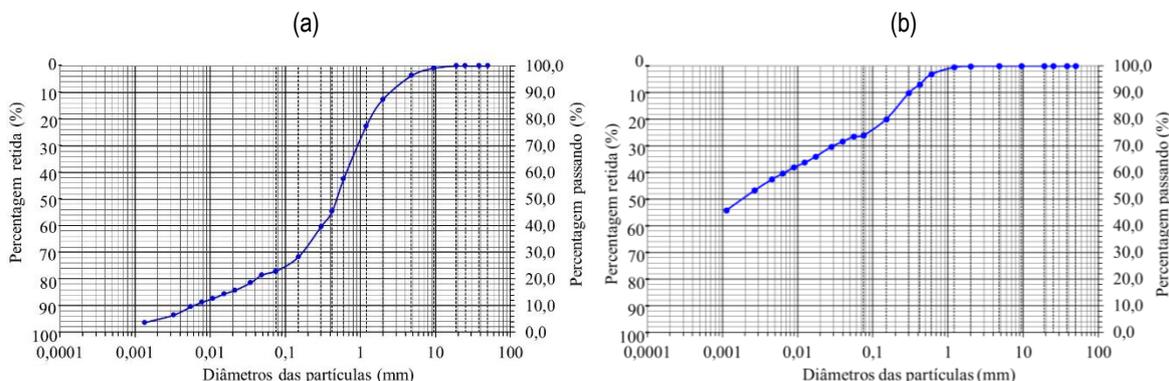


Tabela 1. Características dos materiais utilizados para fabricação dos corpos de prova

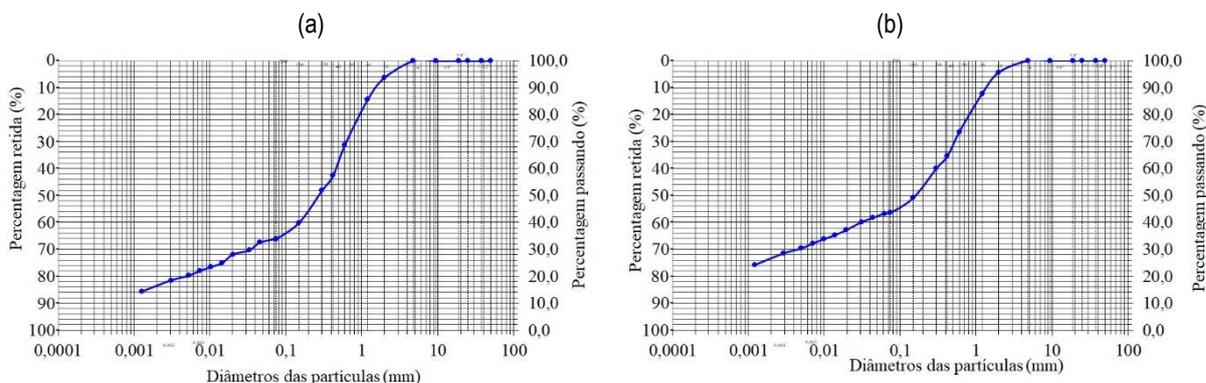
	Solo	Filito	M01	M02
Teor de umidade (%)	2,80	16,69	4,58	7,67
Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,74	2,68	2,69
Limite de liquidez (%)	47,08	63,21	36,29	42,06
Limite de plasticidade (%)	27,65	34,04	21,29	23,21
Índice de plasticidade (%)	19,43	29,17	15,00	18,85
Pedregulho	4,00	0,00	0,00	0,00
Areia	75,00	27,00	66,50	57,50
Silte	12,00	16,00	13,50	12,50
Argila	9,00	57,00	20,00	30,00

Com o objetivo de verificar a influência do teor de argila na retração do adobe e consequentemente a eficácia da contenção da retração pelas fibras R-PET, foram elaboradas duas misturas (M01 e M02) com diferentes teores de argila: a mistura M01 foi fabricada com 68% de solo natural e 32% de filito e a mistura M02 com 50% de solo natural e 50% de filito. As curvas granulométricas das misturas M01 e M02 são apresentadas na Figura 2 e os valores obtidos das curvas juntamente com os valores de teor de umidade, densidade dos grãos, limite de liquidez e de plasticidade e índice de plasticidade



são apresentados na Tabela 1. De acordo com a análise dos dados e segundo as recomendações de Barbosa e Ghavami <sup>(11)</sup>, as duas misturas foram consideradas adequadas para a fabricação de adobe.

Figura 2 - Curvas granulométricas do solo corrigido: (a) mistura M01 (68% de solo + 32% de filito) e (b) mistura M02 (50% de solo + 50% de filito).



As fibras de PET (politereftalato de etileno) recicladas (R-PET) utilizadas neste estudo são industrializadas e foram produzidas pela MG Fibras Brasil, a partir de flocos de poliéster obtidos da reciclagem de garrafas PET. As fibras R-PET, mostrada na Figura 3, possuem um comprimento de 32 mm, diâmetro igual a 14  $\mu\text{m}$  e densidade de 1,43  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Tais fibras tem tido aplicação, segundo o próprio fabricante, majoritariamente na indústria têxtil. No entanto, neste trabalho, elas foram utilizadas como reforço do adobe.

Figura 3 - Fibras de R-PET



## 2.2. Produção das amostras

Foram produzidas cinco diferentes misturas, variando-se os teores de solo natural, filito e fibras de R-PET. As fibras de R-PET foram adicionadas em teores de 0,25% e 0,50% em relação ao volume total de materiais secos da mistura (solo e filito). As misturas produzidas são apresentadas na Tabela 2.



Tabela 2 - Dosagem das misturas.

Ingredientes	M01-0	M01-0.50	M02-0	M02-0.25	M02-0.50
Solo natural/(solo + filito) (%)	68,00	68,00	50,00	50,00	50,00
Filito/(solo + filito) (%)	32,00	32,00	50,00	50,00	50,00
Água/(solo + filito) (%)	16,50	16,50	18,00	18,00	18,00
Volume de R-PET (%)	-	0,50	-	0,25	0,50

A quantidade de água a ser adicionada a cada tipo de mistura foi determinada seguindo o método prático apresentado por Barbosa e Ghavami <sup>(11)</sup>. O método consiste em se adicionar água lentamente de forma a tornar a mistura trabalhável. Molda-se então uma esfera com cerca de 8cm de diâmetro e deixa-a cair de uma altura de 1,50m. Depois do choque da esfera com o chão, mede-se a sua altura e diâmetro. Se a altura da esfera corresponder a cerca de um terço do seu diâmetro, a quantidade de água na mistura está adequada.

Para a mistura M01 com 68% de solo natural e 32% de filito, adicionou-se 16,5% de água em relação à massa de material seco total (solo + filito) e para a mistura M02 (50% de solo e 50% de filito) foi adicionado 18% de água em relação à massa de material seco total.

Em relação à mistura, optou-se por misturar os componentes amassando-os com os pés, como tradicionalmente se faz no processo de confecção do adobe. Primeiro foi realizada a mistura do solo com o filito, em seguida a água foi adicionada e por último as fibras de R-PET. A fibra foi adicionada lentamente na mistura, enquanto esta era revolvida e pressionada, de forma a dispersar adequadamente as fibras, evitando assim concentrações de fibras na mistura. Após homogeneização, a mistura foi colocada nas fôrmas em cerca de 3 camadas e consolidada manualmente. Os moldes utilizados eram desmontáveis, de modo a possibilitar a desforma sem provocar deformações nos corpos de prova.

Após a moldagem, os corpos de prova foram posicionados livres, em uma superfície plana (Figura 4), de forma a não ocorrer restrição de deformação.



Figura 4 – Corpos de prova para os ensaios de a) flexão, retração e b) compressão em processo de secagem.



### 2.3. Técnicas de ensaios

O ensaio de retração foi realizado em 5 corpos de prova prismáticos (30x5x5 cm) com uma das dimensões preponderantes, como proposto por Barbosa e Ghavami <sup>(11)</sup>. Medidas do comprimento foram feitas após a moldagem e aos 23 dias de idade com um paquímetro. A retração linear foi determinada dividindo-se a variação de comprimento pelo comprimento inicial.

Nos ensaios de flexão e compressão foi utilizada uma prensa da marca Losenhausenwerk com capacidade de 6 toneladas. A carga foi aplicada a uma velocidade de 0,25 MPa/seg. Nos ensaios de flexão, foram utilizados os mesmos corpos de prova usados para os ensaios de retração (Figura 4a) com um vão de 20 cm e nos ensaios de resistência à compressão foram utilizados 6 corpos de prova cúbicos (10 x 10 x 10 cm) por mistura (Figura 4b).

Para realização do ensaio de absorção, foram utilizados 3 corpos de prova cúbicos (10 x 10 x 10 cm). Conforme ensaio sugerido por Van Lengen <sup>(10)</sup>, os tijolos de adobe foram submersos em água por 4 horas, pesados e, em seguida serrados com o fim de averiguar a extensão na penetração de água no corpo de prova.



### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Resistência à compressão e flexão

Os valores médios de resistência à compressão, tensão de primeira fissura e tensão máxima pós fissuração dos ensaios de flexão são apresentados na Tabela 3 juntamente com o desvio padrão em parênteses.

Tabela 3 – Resultado dos ensaios de compressão e flexão

	M01-0	M01-0.5	M02-0	M02-0.25	M02-0.5
Resistência à compressão (MPa)	1,21 (0,15)	1,24 (0,18)	1,52 (0,25)	1,71 (0,09)	1,81 (0,13)
Tensão de 1ª fissura (MPa)	0,38 (0,04)	0,46 (0,05)	0,45 (0,04)	0,42 (0,03)	0,47 (0,02)
Tensão máxima pós fissuração (MPa)	-	-	-	-	0,55 (0,05)

Os resultados dos ensaios de compressão indicam que os valores de resistência à compressão da mistura M02 (com e sem fibras) são muito maiores que aqueles obtidos pela mistura M01 (com e sem fibras). O maior valor de resistência à compressão foi obtido para a mistura de adobe reforçado com 0,5% de fibras R-PET (M02-0,50). Isto indica o efeito benéfico das fibras R-PET na resistência à compressão. Contudo, o efeito da adição das fibras na resistência à compressão da mistura M01 não é visível. Os valores de resistência à compressão das misturas M01-0.50 (com 0,5% de fibras R-PET) e M01-0 (sem fibras) são praticamente iguais.

O modo de ruptura típicos dos corpos de prova sem fibras e com fibras, mostrados na Figura 5, indicam mudanças benéficas na forma de ruptura devido a adição de fibras de R-PET para todos os teores e misturas.

Figura 5 – Fratura típica após ensaios de compressão. Corpos de prova (a) sem fibras e (b) com fibras de R-PET.



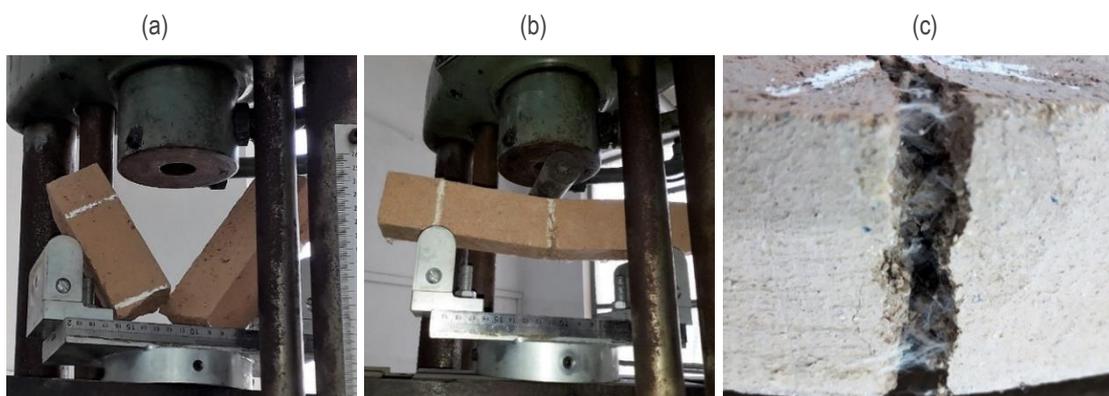
Em relação aos ensaios de flexão, os valores apresentados na Tabela 3 indicam que houve um aumento de 21% na tensão de primeira fissura quando 0,50% de fibras R-PET foi adicionada à mistura



M01. Contudo, não foram observados aumentos significativos na tensão de primeira fissura da mistura M02 com o uso de 0,25% e 0,5% de fibras R-PET.

Observa-se também que o maior benefício das fibras foi para a mistura M02-0.50, que apresentou incremento de tensão após fissuração da matriz (0,55MPa), indicando um comportamento mais dúctil da mistura. Este tipo de comportamento é melhor visualizado observando-se o modo de ruptura dos corpos de prova, na Figura 6a, 6b e 6c. Observa-se que todas as misturas com fibras apresentaram uma ruptura mais dúctil (Figura 6b), com a presença de fibras que cruzam a fissura (Figura 6c), comportamento contrário ao observado nos corpos de prova sem fibras (Figura 6a). Este tipo de comportamento era o esperado, pois segundo Bentur e Mindess <sup>(13)</sup>, as fibras que atravessam as fissuras atuam como uma ponte de transferência de tensões entre as partes da matriz separadas pela fissura, tornando a matriz mais dúctil e modificando o seu modo de ruptura.

Figura 6 – Ruptura típica dos corpos de prova (a) sem fibras (M01-0 e M02-0) e (b) com fibras (M01-0.50, M02-0.25 e M02-0.50) após ensaio de flexão e (c) detalhe das fibras cruzando a fissura na amostra M02-0.50.



### 3.2. Retração e absorção de água após 4h de imersão

Na Tabela 4 são mostrados os valores médios de retração das diferentes misturas aos 23 dias de idade juntamente com o desvio padrão em parênteses. De uma forma geral, e, como esperado, as fibras de R-PET tem um efeito positivo na redução da retração e, nenhum processo de fissuração ou fratura foi observado nos corpos de prova das diferentes misturas.

Pode-se observar nos valores da Tabela 4 que o efeito das fibras foi mais visível na mistura M02 com maior teor de argila. Por exemplo, a mistura M02-0, com 50% de solo e 50% de filito e sem fibras, apresentou 5,25% de retração aos 23 dias. Quando 0,50% de fibras R-PET (M02-0.50) foi adicionada à mistura, o valor de retração foi reduzido para 4,37%. Os resultados indicaram uma redução brusca de 16,8% no valor da retração. Já a mistura M01-0.50, com 68% de solo, 32% de filito e 0.50% de



fibras R-PET, apresentou uma redução de retração de somente 2% em relação a mistura M01-0, sem fibras.

**Tabela 4. Valores médios de retração e desvio padrão (em parênteses) das misturas aos 23 dias de idade.**

	M01-0	M01-0.5	M02-0	M02-0.25	M02-0.5
Retração (%)	4,62 (0,59)	4,53 (0,27)	5,25 (0,57)	3,57 (0,30)	4,37 (0,77)

Esta diferença de comportamento entre as misturas pode ser explicada pelas diferentes composições das misturas. A mistura M01 apresenta valores mais altos de areia (66,5%) e silte (13,5%) e valores mais baixos de argila (20%), quando comparado a mistura M02, com 57,5% de areia, 12,5% de silte e 30% de argila. A argila é o componente da mistura que mais contribui para o aumento da retração e a areia, por ter grãos maiores que a argila, serve como uma restrição no processo de deformação<sup>(20)</sup>. Devido a isto a mistura M02 possui uma maior deformação por retração que a mistura M01, sendo o efeito das fibras mais visível na mistura M02. Outro fator que influencia este efeito é o maior teor de água na mistura M02 (ver Tabela 2).

Corroborando com o comportamento acima explicado, observamos que a mistura M01 sem fibras (M01-0) apresentou uma acentuada redução nos valores de retração em relação a mistura M02 sem fibras (M02-0).

Comparando-se ainda os valores de retração das misturas M02-0.25 e M02-0.50, na Tabela 4, observou-se um aumento de 3,57% para 4,37%. Seria de se esperar, todavia, que as retrações fossem menores nos prismas da mistura M02-0.5 em comparação com os prismas da mistura M02-0.25, uma vez que a mistura M02-0.50 tem maior volume de fibras e as fibras ajudam a conter a retração. A explicação para este efeito é a possível aglomeração e dispersão heterogênea das fibras na mistura M02-0.5.

Em relação ao ensaio de absorção, após 4 horas submersos, os corpos de prova sem fibras apresentaram significativa perda de material, principalmente nas bordas, não sendo possível, por conseguinte, estabelecer os valores de absorção para os corpos de prova sem fibras (M01-0 e M02-0). Os corpos de prova com fibras (M01-0.50, M02-0.25 e M02-0.50), por outro lado, permaneceram completamente íntegros, sendo possível o cálculo da absorção por meio da pesagem dos corpos de prova antes e depois de 4 horas de submersão. Os corpos de prova com fibras apresentaram absorção entre 17,29% e 18,75%.



## 4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um estudo sobre a influência de fibras R-PET no desempenho do adobe. Após análise dos resultados experimentais chegou-se às seguintes conclusões:

- Vários efeitos benéficos foram observados com a inserção de fibras de R-PET no adobe. A dosagem que produziu melhores resultados em termos gerais foi a M02-0.5, com 0,5% de fibras R-PET e composição de 50% de solo e 50% de argila na matriz.
- Nos ensaios de flexão pôde-se perceber um aumento da resistência pós fissuração ao se adicionar 0,5% de fibras de R-PET a mistura. Além disto, também foi observado uma melhora na ductilidade e na forma de ruptura dos corpos de prova com adição da fibra de R-PET.
- Em relação aos ensaios de compressão, foi percebido uma clara tendência de aumento da resistência à compressão com a inserção e aumento da concentração das fibras de R-PET nas misturas. Também foram observadas mudanças na ruptura das amostras, passando de uma ruptura frágil dos corpos de prova sem fibras, para uma ruptura dúctil dos corpos de prova com fibras.
- Os resultados também indicaram que é possível controlar a retração de adobes com o uso de fibras de R-PET como reforço. Foi observado redução da retração até 48% em relação à referência, especialmente para altas dosagens de fibras (0,5%) na mistura com maior teor de argila.
- Na análise da absorção de água após 4h de imersão, por sua vez, observou-se que somente os corpos de prova sem fibras sofreram desagregação. Indicando um efeito positivo no uso das fibras de R-PET em adobe e na presença de água, o que não quer dizer, no entanto, que se tornem impermeáveis, ou mesmo que mantenham sua capacidade de resistência.

Por fim, os resultados deste trabalho são iniciais e visam contribuir com o melhor entendimento dos mecanismos de estabilização de misturas de adobe com fibras de R-PET e ampliar o seu uso em construções rurais e urbanas. Nesse sentido, a construção civil poderia ganhar com a adoção de adobe com fibras recicladas de PET, uma vez que são materiais relativamente baratos e ecologicamente sustentáveis. No entanto, mais ensaios precisam ser feitos com diferentes teores de fibra e com misturas com diferentes dosagens, de forma a se ter maior clareza com relação à influência das fibras R-PET no desempenho do adobe.



## 5. REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Décimo censo da reciclagem do PET no Brasil, 2016.
2. CAMPBELL, J. W. P., PRYCE, W. **História universal do tijolo**. Caleidoscópio, 2009
3. CÂMARA, V. F. et al. **Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de Santa Catarina, Brasil**. Cerâmica, São Paulo, 2015. v. 61, n. 358, p. 213-218.
4. AKINSHIPE, O., KORNELIUS, G. **Quantification of atmospheric emissions and energy metrics from simulated clamp kiln technology in the clay brick industry**, Environmental Pollutio. 2018.v. 236, p 580-590.
5. AMARAL, F. A. **Bloco de adobe: efeitos da adição de fibra de epicarpo do babaçu**. Dissertação. (Mestrado em Design). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão (CCET, UFMA). São Luís, Maranhão, 2017.
6. BATTISTELLE, R. A. G. **Análise da Viabilidade Técnica do Resíduo de Celulose e Papel em Tijolos de Adobe**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002. (CRHEA/EESC/USP), São Carlos, SP.
7. BOUTH, J. A. C. **Estudo da potencialidade da produção de tijolos de adobe misturado com outros materiais: uma alternativa de baixo custo para a construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005. Natal, RN.
8. SILVA, A. C. *et al.* **Utilização do resíduo da castanha de caju na confecção de tijolos de terra crua (adobe): alternativas para redução do custo final de moradias de interesse social no Brasil**. In: X encontro de geógrafos da américa latina. Universidade de São Paulo, 2005.
9. COSTA, *et al.* **Avaliação de tijolos de adobe com adição de cinzas e fibras de coco**. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, Alagoas, 2014. ENTAC.
10. VAN LENGEN, J. **Manual do arquiteto descalço**. 1. ed. São Paulo: B4. 2014.
11. BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Terra crua para edificações**. In: Isaia, G. C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. IBRACON, 2010. p. 1565 – 1598.
12. HOUGET, V. **Etude des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de composites ciments-fibres organiques**. 1992.
13. BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Modern Concrete Technology Series. Taylor & Francis, 2007
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
19. AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700: Masonry structures**. Sydney, 2001.



20. BLONDET, M.; GARCIA, M.; VILLA, G. **Earthquake Resistant Earthen Buildings**. 13th World Conference on Earthquake Engineering (2594), 2004



## ANÁLISE DOS EFEITOS DA TEMPERATURA NO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOLONHA (BELÉM, PA)

J.V.R., SOARES<sup>(1)</sup>; W.S., MARTINS<sup>(2)</sup>; I.P., FREITAS<sup>(3)</sup>; W,  
WANZELER<sup>(4)</sup>

(1) Universidade Federal do Pará (UFPA) – [Jovirsoares@gmail.com](mailto:Jovirsoares@gmail.com); (2) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [wallysonsmartins@gmail.com](mailto:wallysonsmartins@gmail.com); (3) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [bellaparriao@hotmail.com](mailto:bellaparriao@hotmail.com); (4) Universidade Federal do Pará (UFPA) - [waleriacwanzeler@gmail.com](mailto:waleriacwanzeler@gmail.com)

### RESUMO

A crescente preocupação com o destino de resíduos agressores ao meio ambiente provocou o aumento de estudos visando o destino correto destes resíduos. Entre esses, tem-se o lodo de estações de tratamento de água (LETA), o qual é despejado nos corpos d'água, sem nenhum tratamento. Para aplicá-lo, é importante conhecer suas características e suas potencialidades. Portanto, este estudo objetiva avaliar os efeitos da calcinação em temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C no LETA Bolonha, para conhecer suas características físico-químicas e mineralógicas. Portanto, fez-se necessário realizar os ensaios de difração de raios X, fluorescência de raios X, massa específica e granulometria a laser, nos lodos *in natura* e calcinados. A partir da fluorescência, percebeu-se que o LETA é composto principalmente pelos óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ), de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Constatou-se, por meio da análise mineralógica, que no lodo *in natura* a caulinita é o mineral predominante mas, em temperaturas superiores a 500°C, há uma quebra da sua estrutura cristalina, formando a metacaulinita amorfa, mais reativa. Assim, através dos resultados das técnicas utilizadas, concluiu-se que as características das partículas são importantes para uma futura aplicação em materiais compósitos de matriz cimentícia ou geopolímeros, uma vez que são ricos em alumina e sílica.

**Palavras-chave:** Análise Térmica; Reaproveitamento de resíduo; Resíduo Caulinítico; Resíduo de ETA

## ANALYSIS OF TEMPERATURE EFFECTS IN THE SLUDGE OF THE WATER TREATMENT STATION BOLONHA (BELÉM, PA)



## ABSTRACT

The growing concern about the fate of environmental wastes has led to an increase in studies aiming at the correct destination of these wastes. Among these residues are the sludge from water treatment plants (LETA), which is dumped into bodies of water without any treatment. To apply it, it is important to know its characteristics and potentialities. Therefore, this study aims to evaluate the effects of calcination at temperatures of 600 °C, 700 °C and 800 °C in the LITA Bologna, to know its physical-chemical and mineralogical characteristics. Therefore, it was necessary to carry out X-ray diffraction, X-ray fluorescence, specific mass and laser granulometry tests in the in natura and calcined sludge. From the fluorescence, it was noticed that the LETA is composed mainly of the oxides of silicon ( $\text{SiO}_2$ ), aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and iron ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). It has been verified, through mineralogical analysis, that in the mud in natura the kaolinite is the predominant mineral but, in temperatures higher than 500 °C, there is a breakdown of its crystalline structure forming the amorphous metacaulinite, more reactive. Thus, through the results of the techniques used, it was concluded that the characteristics of the particles are important for a future application in cementitious matrix composites or geopolymers since they are rich in alumina and silica.

**Key-words:** Thermal analysis; Reuse of waste; Caulinotic residue; ETA residue

## 1. INTRODUÇÃO

Com o exponencial crescimento populacional, cresce a demanda de recursos consumíveis, como a água. Uma vez que a água disponível em rios não está nas condições ideais de potabilidade para consumo, nasce a necessidade de estações de tratamento de água (ETA) para tratá-la e torná-la própria para consumo. O tratamento da água em uma ETA comum envolve os processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Como subproduto do tratamento da água na ETA, o Lodo da estação de tratamento (LETA) é produzido diretamente pelos processos de coagulação, sedimentação e decantação, pois há lançamento de coagulantes na água a fim de desestabilizar as partículas coloidais formadas pela reação dos coagulantes com água e sólidos em suspensão (impurezas), com o objetivo de formar agregados gelatinosos e, assim, decantá-los. Esses agregados, sem tratamento, são descartado em cursos d'água que normalmente encontram rios.

Em uma estação de tratamento comum, cerca de 100.000 toneladas de LETA são produzidas por ano (AHMAD; AHMAD; ALAMET, 2016)<sup>(1)</sup> e, muito embora seja fácil, o descarte do lodo no meio ambiente não deve ser feito, por este ser tão abrasivo ao meio ambiente, uma vez que pode provocar a



contaminação dos cursos d'água com metais leves e pesados. Sendo assim, a preocupação em fornecer um fim sustentável ao lodo da estação de tratamento gera esforços contínuos da área acadêmica para encontrar formas de descarte apropriado ao lodo da estação de tratamento, haja vista que há possibilidade de ser uma matéria prima, com potencial econômico ainda inexplorado. O resíduo de estação de tratamento já vem sendo objeto de pesquisa na construção civil, sendo alvo de estudos para sua utilização prática. Porém, verificam-se problemas na aplicação do lodo enquanto material pois, segundo Sales, Souza e Almeida (SALES; SOUZA; ALMEIDA, 2010)<sup>(2)</sup> o uso do lodo na produção de concreto provocou um aumento na quantidade de água necessária para misturá-lo, diminuindo, portanto, sua resistência. Problemas esses que poderiam ser investigados a fim conhecer as características do lodo e aprimorar seu desempenho.

Por conta do baixo padrão da qualidade da água bruta captada, as ETAs sofrem algumas implicações internas com o aumento do consumo de produtos químicos, particularmente do sulfato de alumínio (SILVA, 2016)<sup>(3)</sup>. A Estação de tratamento de água Bolonha, situada em Belém do Pará, utiliza sulfato de alumínio para decantar as impurezas da água, por isso, neste estudo, verificou-se que de forma geral, o lodo da ETA Bolonha é constituído fundamentalmente por óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), e óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), além de outros metais pesados em pequenas quantidades que, se descartados irregularmente, podem causar danos significativos ao meio ambiente (Ahmad; Ahmad; Alam, 2015)<sup>(4)</sup>. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar os efeitos da calcinação à 600 °C, 700 °C e 800 °C, do lodo da estação de tratamento de água Bolonha, a fim de conhecer suas características físicas, químicas e mineralógicas para aplicar este conhecimento de forma eficaz na produção de materiais na construção civil.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Reaproveitamento do Lodo de ETA como material de construção civil**

Nos últimos anos, surgiu uma tendência para o uso benéfico do lodo de ETA, o qual vem deixando de ser considerado um “resíduo” para ser considerado uma “matéria-prima”. Devido às características físico-químicas e mineralógica do LETA. Algumas linhas de pesquisa têm investigado o reaproveitamento do lodo como material de construção civil em diferentes aplicações: fabricação de tijolos e materiais cerâmicos, agregado leve, substituição a areia, geopolímero e substituição parcial



ao cimento Portland. A Tabela 1 apresenta alguns estudos desenvolvidos com diversas aplicações do LETA *in natura* e ativado pelo processo de calcinação no Brasil e no mundo.

Tabela 1 – Estudos desenvolvidos com LETA *in natura* e calcinado.

Autores	Local de Origem	Aplicação do LETA		Teores Utilizados
		In natura	Calcinado	
Tafarel <i>et al.</i> (2016) <sup>(5)</sup>	Paraná, Brasil	Agregado miúdo em concreto	–	5 e 10%
Gomes <i>et al.</i> (2016) <sup>(6)</sup>	Paraná, Brasil	Agregado miúdo em concreto	–	5; 7 e 10%
Benlalla <i>et al.</i> (2015) <sup>(7)</sup>	Bouregreg, Marrocos	Cerâmica estrutural	–	5 a 30%
Teixeira <i>et al.</i> (2011) <sup>(8)</sup>	São Paulo, Brasil	Cerâmica vermelha	–	10 a 20%
Kizinievič <i>et al.</i> (2013) <sup>(9)</sup>	Vínius, Lituânia	Tijolos	–	5 a 40%
Huang e Wang (2013) <sup>(10)</sup>	Hsing-Zu, Taiwan	Agregado Leve	–	5 a 15%
Geraldo <i>et al.</i> (2017) <sup>(11)</sup>	São Paulo, Brasil	–	Geopolímeros	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,2$ $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = 0,2$
Ahmad <i>et al.</i> (2018) <sup>(12)</sup>	Ghaziabad, Índia	–	Cimento Portland	10, a 25%
Rocha <i>et al.</i> (2017) <sup>(13)</sup>	Porto Alegre, Brasil	–	Cimento Portland	0 a 10%
Gastaldine <i>et al.</i> (2015) <sup>(14)</sup>	Rio Grande do Sul, Brasil	–	Cimento Portland	5% a 30%
Frias <i>et al.</i> (2014) <sup>(15)</sup>	Caracas, Venezuela	–	Cimento Portland	15%
Batalha (2012) <sup>(16)</sup>	Manaus, Brasil	–	Cimento Portland	5 a 15%

### 2.1.1. Agregados Leves

Os agregados leves são produtos cerâmicos altamente porosos e esféricos com baixa densidade (0,8 a 2,0 g / cm<sup>3</sup>) e comumente usados na fabricação de vários produtos de construção (Soltan *et al.*, 2016)<sup>(17)</sup>. O possível uso do lodo de ETA para a produção de agregado leve foi estudado pelos pesquisadores Huang e Wang (Huang e Wang, 2013)<sup>(10)</sup>. Os experimentos nesse estudo envolveram lodos de 10 estações de tratamento de água de Taiwan. O lodo coletado na ETA de Hsing-Zu, apresentou os melhores resultados para a fabricação de agregado leve estrutural e não estrutural em



larga escala, usando um forno rotativo comercial. Os agregados resultantes do lodo desta ETA possuíam uma densidade de partícula de  $1,3 \text{ g/cm}^3$  ou  $0,98 \text{ g/cm}^3$  e uma densidade aparente de  $726 \text{ kg/m}^3$  ou  $518 \text{ kg/m}^3$  para o agregado leve estrutural e agregado leve não estrutural, respectivamente. O agregado leve estrutural atendeu aos requisitos da norma ASTM C330. Os autores concluíram que as propriedades de engenharia do concreto feitas a partir do agregado leve estrutural produzidos com lodo da ETA de Hsing-Zu atendem aos requisitos de concreto estrutural leve.

### 2.1.2. Fabricação de tijolos e materiais cerâmicos.

À exemplo Benlalla *et al.*, (Benlalla *et al.*, 2015)<sup>(7)</sup>, avaliaram os efeitos da incorporação do LETA de Bouregreg, localizada em Marrocos, sobre as propriedades e microestrutura da argila utilizada como matéria-prima para a fabricação de cerâmica. O LETA foi adicionado a mistura substituindo a argila em diferentes proporções que variavam de 5 a 30%. As amostras destas misturas foram queimadas a temperatura de 800, 900 e 1000 °C. As amostras testadas apresentaram alta resistência mecânica, sem deformação ou defeitos. No entanto os autores concluem que no total, a melhor proporção de LETA no tijolo é de 20%, com um teor ótimo de umidade de 30%, preparado nas misturas moldadas e queimadas entre 900 °C e 930 °C para produzir tijolos de boa qualidade.

### 2.1.3. Substituição à Areia

Tafarel *et al.*, (Tafarel *et al.*, 2016)<sup>(5)</sup> substituíram parcialmente a areia natural presente no concreto por um LETA à base de alumínio, em proporções de até 10% do peso seco da areia. Considerando os resultados, apenas as amostras com 5% de substituição de lodo apresentaram desempenho satisfatório de resistência à compressão de 15,5 MPa aos 28 dias, decréscimo na resistência próximo a 11% quando comparado ao concreto de referência. A incorporação de 5% e 10% de lodo levou a um aumento na absorção de água de 12% e 32%, respectivamente.

Em pesquisa semelhante, Gomes *et al.* (2017)<sup>(6)</sup> investigaram os efeitos do lodo à base de alumínio em sua forma natural (úmida), variando de 0, 5, 7 e 10% de substituição de areia em concreto. Os resultados mostraram que a adição de lodo úmido reduziu a resistência mecânica e aumentou a absorção de água, pois mesmo 5% da substituição do lodo levou a uma redução de 50% na resistência à compressão e 45% na absorção de água.

### 2.1.4. Geopolímero



Geraldo *et al.*, (Geraldo *et al.*, 2017)<sup>(11)</sup> investigaram a substituição parcial do metacaulim (MK) pelo lodo de ETA na composição da argamassa geopolimérica. Uma solução alternativa ativadora alcalina foi preparada com NaOH e cinza da casca de arroz (substituindo o silicato de sódio). Além disso, devido à quantidade de SiO<sub>2</sub> ser menor no lodo de ETA em comparação com o MK, uma quantidade extra de cinza de casca de arroz foi adicionada nas misturas para equilibrar e aumentar a relação SiO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os resultados mostraram que à medida que a proporção de lodo de ETA aumentou, o tempo de acerto aumentou simultaneamente. O tempo final de decantação das amostras variou de 3,22 a 5,32 h; que foram maiores em comparação com geopolímeros de cinzas volantes para a mesma temperatura. A resistência à compressão e a trabalhabilidade das amostras diminuíram conforme a adição de Lodo de ETA. As resistências mecânicas em todas as idades de cura foram superiores ao mínimo requerido para os diversos tipos de componentes de construção, de acordo com a norma brasileira (tijolo de argila-fogo > 1,5 MPa, tijolo de solo-cimento > 2,0 MPa, bloco de concreto > 3,0 MPa).

#### 2.1.5. Substituição parcial do cimento Portland por cinzas do lodo de ETA

Batalha (Batalha, 2012)<sup>(16)</sup>, estudou sobre a produção de argamassa de cimento Portland com a utilização da cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus em substituição parcial ao cimento Portland. A cinza do lodo, obtida após os processos de secagem, moagem e calcinação na temperatura de 650 °C, foi usada como componente da mistura substituindo parcialmente o cimento em 5%, 10% e 15% em massa. Os resultados apresentados mostram que o uso da CLETA é viável tecnicamente: as resistências à compressão das argamassas com teor de 5% e 15% de cinza substituindo o cimento apresentaram, aos 28 dias, resultados estatisticamente iguais em comparação à argamassa de referência. O ensaio de porosimetria mostrou que a cinza além de proporcionar redução no consumo de cimento na mistura, atuou no refinamento da estrutura de poros da argamassa com 5% de CLETA, reduzindo 15,64% os macroporos e aumentando em 4% os mesoporos em relação à argamassa de referência. No ensaio de absorção por capilaridade, as argamassas apresentaram taxas menores em relação à argamassa de referência, comprovando o efeito fíler da CLETA na matriz.

### 3. METODOLOGIA



### 3.1. Coleta do lodo da estação de tratamento de água (LETA) Bolonha.

O resíduo utilizado neste trabalho foi coletado no dia de limpeza dos decantadores da Estação de Tratamento de Água Bolonha, na cidade de Belém, estado do Pará. O procedimento de limpeza dos decantadores do lodo da ETA Bolonha é realizado a cada 30 dias.

O resíduo ficou exposto ao sol durante 72 h em processo de secagem e decantação em um recipiente plástico para facilitar a retirada do excesso de água. Em seguida, o resíduo foi submetido a um processo de secagem em estufa de laboratório a 105 °C por 24 h e destorroado, constituindo-se na amostra de trabalho, a qual foi denominada de resíduo (lodo) de ETA. A Figura 1 mostra o lodo no recipiente de plástico para decantação.

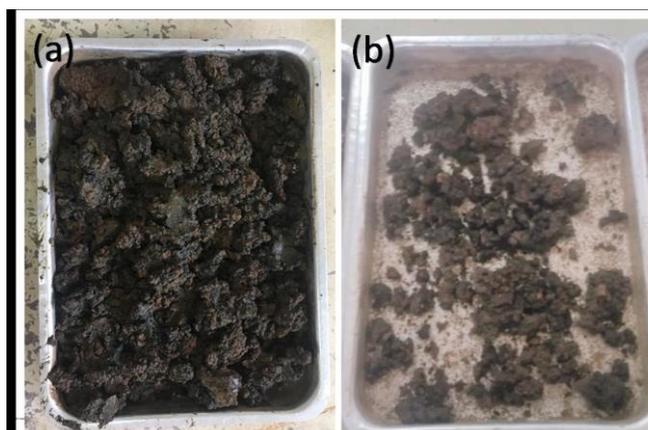
Figura 1 – LETA Bolonha exposto ao sol



### 3.2. Tratamento térmico do lodo da estação de tratamento (LETA) Bolonha

O lodo da estação de tratamento (LETA) coletado foi exposto ao sol para secagem inicial, processo que não garantiu a obtenção da sua constância de massa (lodo seco). Por conta do alto teor de umidade ainda presente, o material parcialmente seco foi colocado em bandejas de alumínio para a secagem em uma estufa ventilada, em uma temperatura de 105±5 °C. A figura 2 compara o lodo antes da secagem na estufa ventilada e após a secagem na estufa ventilada.

Figura 2 – (a) Lodo da ETA bruto; (b) Lodo da ETA após a secagem à 105 °C em estufa



Após a sua secagem em estufa, as amostras do lodo da ETA foram submetidas ao processo de calcinação em temperaturas de 600 °C, 700 °C e 800 °C em um forno mufla com 220V de voltagem e 3720 W de potência, no laboratório de engenharia mecânica na Universidade Federal do Pará (UFPA). O procedimento ocorreu a uma taxa de aquecimento do forno de 10 °C/min, com duração de 2 horas para cada temperatura de calcinação (600 °C, 700 °C e 800 °C). A fim de evitar contaminação, utilizou-se dois cadinhos cerâmicos como recipientes do material, para que este fosse colocado no interior do forno mufla para calcinação. Após o desligamento do forno, a amostra ficou no forno mufla por 24h para resfriamento gradual e só então o material foi retirado do forno. Após o processo de calcinação do material, desagregou-se as amostras até que as mesmas fossem passantes na peneira de abertura igual a 75µm. A Figura 3 mostra o lodo *in natura* (seco a 105 °C) e as cinzas do lodo da estação de tratamento de água (CLETA) obtidas após os procedimentos de calcinação nas temperaturas de 600 °C, 700 °C e 800 °C, respectivamente.

Figura 3 – Aspecto físico do LETA Bolonha *in natura* e ativado termicamente a 600 °C (CLETA600), 700 °C (CLETA700) e 800 °C (CLETA800).





### **3.3. Caracterização do Lodo da Estação de Tratamento (LETA) Bolonha.**

A determinação da massa específica do material foi feita de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001)<sup>(18)</sup>, que estabelece o método para a determinação da massa específica do cimento Portland e outros materiais em pó, utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier. A caracterização granulométrica do material foi feita por difração à laser, utilizando um analisador de partículas a laser modelo Analysette 22 Micro Tec Plus da marca Fritsch GmbH, com intervalo de medida de 0,08 a 2000  $\mu\text{m}$ , para gerar as curvas granulométricas das cinzas. Essa análise foi realizada no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações (LAMIGA) do Instituto de Geociências da UFPA

A determinação dos teores dos componentes químicos do LETA *in natura* (seco em estufa a  $105 \pm 5$  °C) foi feita a partir da análise da espectrometria de fluorescência de raio-x, especificada pela NBR 16137 (ABNT, 2016)<sup>(19)</sup>. A composição química do lodo foi determinada em espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Axios Max, da marca PANalytical, o software utilizado para a interpretação dos dados foi a versão de modelo SuperQ51, O procedimento de preparação da amostra foi o de pastilha prensada, amostra e cera orgânica, ensaio de perda ao fogo a 1000 °C e varredura química.

A caracterização mineralógica foi obtida através do ensaio de Difração de Raios X (DRX), pelo método do pó, realizado no Laboratório de Física da UFPA identificando as fases, amorfa ou cristalina, dos minerais que constituem as cinzas do LETA, indicando, caso haja predominância da forma cristalina, baixa atividade e caso apresente-se amorfo, maior potencial pozolânico.

Por fim, a análise termogravimétrica do lodo foi realizada no laboratório PCT Guamá da UFPA no equipamento Mettler Star SW 9.30 em cadinho aberto de platina com taxa de aquecimento do forno igual a 10 °C/ min, dentro do intervalo de temperatura de 40 °C e 1000 °C.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

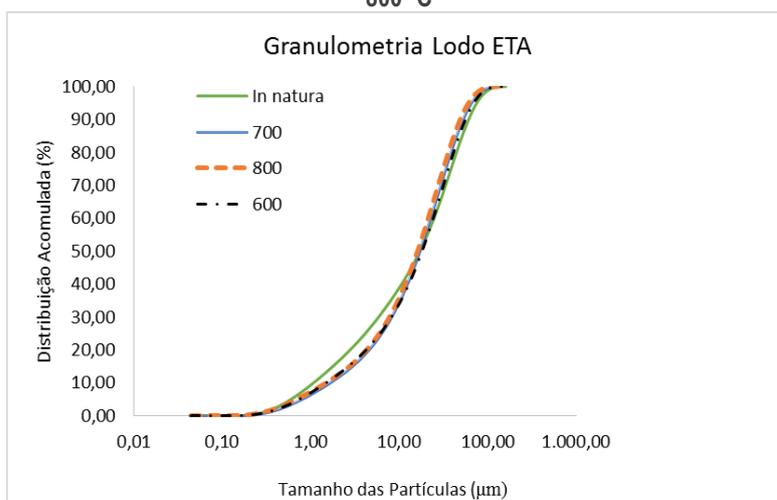
### **4.1. Caracterização das amostras do lodo da ETA Bolonha *in natura* e calcinados**

#### **4.1.1. Granulometria**



A partir da figura 4, percebe-se que com um aumento da temperatura de calcinação, há um aumento do tamanho das partículas, pois a temperatura pode provocar a agregação das partículas, aumentando a granulometria das mesmas (DIETEL *et al.*, 2017)<sup>(20)</sup>. Além disso, as amostras apresentaram uma curva granulométrica contínua, indicando que o material pode ser usado como filer, preenchendo espaços vazios dentro concreto. Porém, segundo Perini *et al.*, (Perini *et al.*, 2016)<sup>(21)</sup>, o aumento da substituição do lodo no cimento faz com que o concreto obtenha uma elevada consistência, prejudicando o adensamento dos corpos- de-prova, além de aumentar a quantidade de água necessária para a hidratação do concreto, diminuindo, portanto, sua resistência. Segundo o critério de finura para material pozolânico da NBR 12653 (2014)<sup>(22)</sup>, um material deve possuir 80% de sua granulometria inferior a 45 µm para ser considerado um material pozolânico. Assim, todas as amostras do LETA calcinado se enquadram no critério da norma citada.

Figura 4 - Curvas granulométricas do lodo da ETA Bolonha in natura e das Cinzas calcinadas a 600 °C., 700 °C. e 800 °C



#### 4.1.2. Massa Específica

Os resultados das massas específicas do LETA *in natura* e das cinzas calcinadas a 600 °C, 700 °C e 800 °C foram determinados por meio da média aritmética de dois ensaios consecutivos. Os resultados dos ensaios estão dispostos na tabela 2.

Tabela 2 – Massa específica do LETA in natura e das amostras LETA ativadas termicamente.

Amostras	Medida	m (g)	V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>médio</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
In natura	1º	38,58	18,6	0,4	2,119	2,120
	2º	38,6	18,4	0,3	2,12	



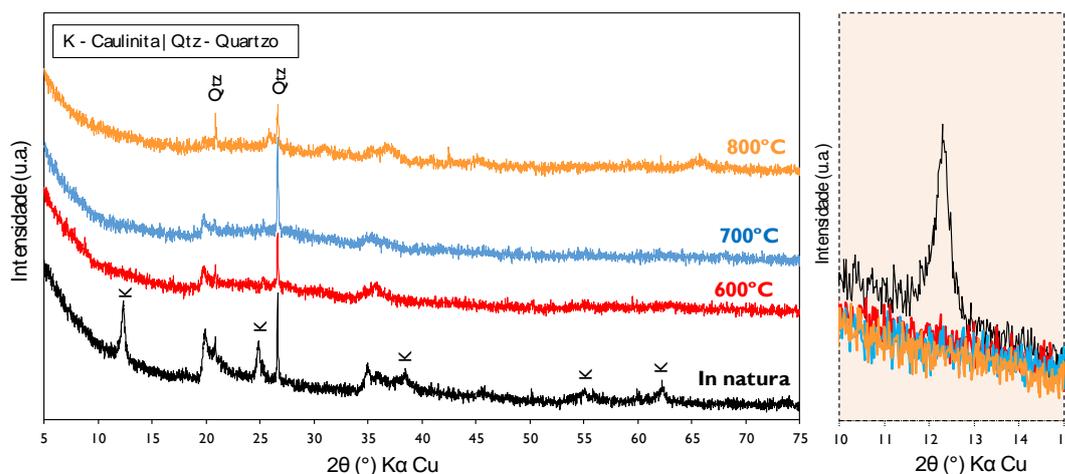
CLETA600	1º	48,38	18,1	0,2	2,7	2,703
	2º	48,42	18,2	0,3	2,705	
CLETA700	1º	48,31	18	0,7	2,792	2,790
	2º	48,5	18,2	0,8	2,787	
CLETA800	1º	49,41	18	0,6	2,840	2,842
	2º	49,5	18,1	0,7	2,845	

De acordo com a tabela 2, verificou-se que conforme a temperatura de calcinação das amostras LETA aumentou, suas massas específicas também aumentaram. Isto sugere uma estrutura mais densa e estável de acordo com o aumento da temperatura de calcinação, comportamento semelhante percebido por Silva (2018)<sup>(23)</sup> para as cinzas de lama vermelha. Isso pode ser explicado pelo aumento da granulometria do material conforme fosse calcinado, pois a temperatura pode provocar agregação no material (DIETEL *et al.*, 2017)<sup>(20)</sup>, aumentando assim sua quantidade de massa por volume.

#### 4.1.3. Difração de raios-x

Observando os resultados do DRX é possível perceber que o LETA *in natura* apresenta picos de difração característicos das fases cristalinas correspondentes à caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e ao quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Além disso, é possível perceber que na temperatura de 600 °C há a manutenção dos picos característicos do quartzo e, principalmente, há a quebra dos picos relacionados à caulinita, que é transformado em metacaulinita em estado amorfo, por conta da temperatura. Entre 600 °C e 800 °C, não houve mudanças significativas no que diz respeito à mineralogia do material, ou seja, permaneceram os mesmos minerais encontrados à 600 °C. Os resultados encontrados são semelhantes a outros estudos, como o de Hagemann *et. al* (2019)<sup>(24)</sup> e Frias *et. al* (2013)<sup>(25)</sup>, os quais perceberam que, ao calcinar e caracterizar amostras de um LETA da Venezuela, a caulinita transformou-se em metacaulinita após ativação térmica à 600 °C, produto bastante pozolânico.

Figura 5 – Difratogramas do LETA *in natura* e das amostras do LETA ativadas termicamente a 600 °C, 700 °C e 800 °C.



#### 4.1.4. Caracterização química.

A composição química do LETA *in natura*, obtida a partir do espectrômetro de fluorescência de raios-X, é mostrada na tabela 3 e discutida a seguir.

Tabela 3 - Análise química por Fluorescência de Raio-X (FRX)

Resíduo do lodo	
Composição Química	% massa
SiO <sub>2</sub>	27,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,5
K <sub>2</sub> O	0,9
MgO	0,6
CaO	0,3
Perda ao fogo (P.F.)	29,90

As concentrações dos óxidos SiO<sub>2</sub> (27,9%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (24,7%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13,5%) na matriz são esperadas, uma vez que este tipo de concentrações são comuns em ETAs usuárias de sais de alumínio (Ahmad; Ahmad; Alam, 2015)<sup>(4)</sup> como coagulante utilizado no processo de tratamento, que reflete diretamente na composição majoritária de alumínio. A sílica presente é um composto que melhora as respostas mecânicas das pastas após o endurecimento, devido à nucleação heterogênea acelerada, ao melhor empacotamento das misturas e à maior reatividade das partículas por serem finas (FLORES *et al.*, 2017)<sup>(26)</sup>. Assim como a sílica, a alumina também aumenta a resistência a compressão de pastas de cimento Portland devido sua capacidade de refinar os poros da mistura, além disso, acelera a hidratação e diminui a trabalhabilidade (GOWDA *et al.*, 2017)<sup>(27)</sup>. Além disso, a alumina também



melhora as propriedades refratárias em concretos, tem alto ponto de fusão e possui boas propriedades mecânicas, se tornando adequada para aplicações em altas temperaturas (KUMAR *et al.*, 2014)<sup>(28)</sup>. O óxido alcalino  $K_2O$  e os alcalinos-terrosos  $CaO$  e  $MgO$ , que apesar de apresentarem baixos valores percentuais, atuam, junto com o óxido de ferro como material fundente (DANTAS, 2008)<sup>(29)</sup> e irão ter grande influência durante a queima, favorecendo a sinterização e a densificação (SILVA, 2005)<sup>(30)</sup>. O alto teor de  $Al_2O_3$  tende a aumentar a propriedade refratária do material, ou seja, ele se torna mais resistente a altas temperaturas (PINHEIRO; HOLANDA, 2010)<sup>(31)</sup>.

Verificou-se perda ao fogo do lodo da ordem de 29,90% para a amostra. Esta perda ao fogo se deve, potencialmente, à presença de águas intersticiais, hidroxilas dos argilominerais e dos hidróxidos existentes. Também, podem ter sido originados a partir da volatilização de componentes da matéria orgânica.

## 5. CONCLUSÃO

Conforme o aumento da temperatura de calcinação do lodo da estação de tratamento de água (LETA) Bolonha, percebeu-se o aumento do tamanho das partículas do material e também de sua massa específica, pois houve a sintetização do material. Percebeu-se também que a ativação térmica do LETA Bolonha altera sua microestrutura, uma vez que este *in natura* é cristalino e pouco reativo, com picos de caulinita e quando termicamente ativado à 600 °C, há a quebra dessa estrutura, transformando os picos de caulinita em metacaulinita amorfa, material altamente pozolânico e reativo; além disso, a composição mineralógica não mudou após a transformação do caulim em metacaulinita. A análise química mostrou que a amostra de lodo possui significativos teores de sílica e alumina.

A partir da análise obtida através do tratamento térmico do lodo da estação de tratamento de água Bolonha, percebemos que o material possui aplicações para a sua reutilização, pois o tratamento térmico provoca melhoras nas propriedades do material. O LETA possui potencial utilização na construção civil, principalmente na produção de materiais com matriz cimentícia e geopolímeros, por este material apresentar teores significativos de alumina e sílica.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. **Sustainable management of water treatment sludge through 3 “R” concept.** *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 1-13, 2016.



2. SALES, A.; SOUZA, F. R.; ALMEIDA, F. C. R. **Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust.** *Construction and Building Materials*, v.25, n.6, p. 2793-2798, 2011
3. SILVA, T. H. P.; RODRIGES, H. A. C; MOREIRA, M. L. T. **Influência da substituição parcial do cimento por CLE na resistência a compressão do concreto.** In: Congresso Técnico e Científico da Engenharia e da Agronomia. Anais. Foz do Iguaçu, 2016
4. AHMAD, T.; AHMAD, K.;ALAM, M. **Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options**, *Procedia Environmental Sciences* ,Volume 35, P. 950-955, 2016.
5. TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q.; NAGALLI, A.; DE FREITAS, D. C.; PASSIG, F. H. **Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água.** *Revista Matéria*, v.21, n. 04, p. 974-986, 2016
6. GOMES, R. K.; POSSAN, E.; DEZEN, B.; SANTOS, G.; COLOMBO, M. **Potential uses of waste sludge in concrete production.** *International Journal Management of Environmental Quality*, v. 28, n.6, p. 821-838, 2017.
7. BENLALLA, A. *et al.* **Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks.** *Applied Clay Science*, v. 118, p. 171-177, 2015.
8. TEIXEIRA, S.R.; SANTOS, G.T.A.; SOUZA, A.E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R. **The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials.***Applied Clay Scienc*, v. 53, p. 561-565, 2011
9. KIZINIEVIČ, Olga *et al.* **Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products.** *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 464-473, 2013
10. HUANG, C. H; WANG, S.Y. **Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate.** *Construction and Building Materials*, v.43, p. 174-183, 2013.
11. GERALDO, R.H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. **Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymers production.** *Journal of Cleaner Production*, V. 149, p. 146-155, 2017.
12. AHMAD, T.;AHMAD, K.; ALAM, M. **Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices.** *Construction and Building Materials*, v.175, p. 664–671, 2018.
13. ROCHA, G.H; WENZEL, M. C; BUSELATTO, D. M; SCHEMMER, L. B; REISS, J. O.; PAVOUX,8R. B.; SANTOS, J. W.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. **Concretos de cimento Portland com substituição de lodo de estação de tratamento de água (ETA): análise da potencialidade de emprego na construção civil.** In: 59° Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. Anais do 59° congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: 2017
14. GASTALDINI. A. LG.; HENGEN, M. F.; GASTALDINI, M. CC.; DO AMARAL, F. D.; ANTOLINI, M. B.; COLETTI, T. **The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition.** *Construction and Building Materials*, v.94, p. 513-520, 2015.
15. FRÍAS, M.; VIGIL DE LA VILLA, R.; DE SOTO, I.; GRACÍA, R.; BALOA, T. A. **Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: Characterization and properties.** *Composites: Part B*, v.60, p. 14-20, 2014
16. BATALHA, C. T. **Avaliação das propriedades da argamassa com substituição parcial do cimento Portland por cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Belém.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Amazônia. Manaus, 2012



17. SOLTAN, A. M. M.; KAHL, W. A.; EL-RAOOF, F.ABD.; ABDEL-HAMID EL-KALIOUBY, B.; ABDEL-KADER SERRY, M.; ABDEL-KADER, NA. **Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay.** Journal of Cleaner Procution, v. 117, p. 139-149, 2016.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica: **NBR NM 23.** Rio de Janeiro, 2001.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio não destrutivo - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica: **NBR 16137**, Rio de Janeiro, 2016
20. DIETEL, J.; WARR, L. N.; BERTMER, M.; STEUDEL, A.; GRATHOFF, G. H.; EMMERICH, K. **The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay.** Applied Clay Science, v. 139, p. 99-107, 2017.
21. PERINI, L.R.; DIAS, L.C.; RECKZIEGEL, T.; SOKOLOVICZ, B.C. **Estudo de aproveitamento do lodo da ETA de Santa Rosa.** 5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves,RS, Brasil, 2016
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais Pozolânicos – Requisitos: **NBR 12653.** Rio de Janeiro, 2015.
23. SILVA, T. H. P.; RODRIGES, H. A. C; MOREIRA, M. L. T. **Influência da substituição parcial do cimento por CLE na resistência a compressão do concreto.** In: Congresso Técnico e Científico da Engenharia e da Agronomia. Anais. Foz do Iguaçu, 2016
24. HAGEMANN, S.E. **Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation.** Journal of Cleaner Production, v.214, p. 916-926, 2019
25. FRIAS, M; VILLA, R. V; GARCIA, R; ROJAS, M. I. S; BALOA, T. A. **Mineralogical Evolution of Kaolin-Based Drinking Water Treatment Waste for use as Pozzolanic Material. The Effect of Activation Temperature.** Journal American Ceramic Society, v. 96, p. 3188-3195, 2013.
26. FLORES, Y.C.; CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L.M. **Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and diferente types of sílica.** Construction and Building Materials, v. 146, p. 524-530, 2017
27. GOWDA, R.; NARENDRA, H.; RANGAPPA, D.; PRABHAKAR, R. **Effect of nano-alumina on workability, compressive strenght and residual strenght at elevated temperature of Cement Mortar.** Materials today: Proceedings, v. 4, p. 12152-12156, 2017.
28. KUMAR, P. H.; SRIVASTAVA, A.; KUMAR, V.; SINGH, V. K. **Implementation of industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of calcined alumina.** Journal of Asian Ceramic Societies, v. 2, p. 371-379, 2014.
29. DANTAS, A. P. A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca.** 2008, 94p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – UFRN, Natal.
30. SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. **Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas.** Cerâmica, v. 51, p. 325-330, 2005.
31. PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. **Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânica de cerâmica vermelha.** Cerâmica, v. 56, p. 237-243, 2010.



# ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES E RESÍDUOS

**Munique Fante<sup>(1)</sup>; David Brandão Nunes<sup>(2)</sup>; Laís Vieira de Souza<sup>(3)</sup>;  
Marlova Piva Kulakowski<sup>(4)</sup>; Francisco Manoel Wohnrath Tognoli<sup>(5)</sup>**

(1) UNISINOS – munifante@hotmail.com; (2) UNISINOS – davidbrnunes@gmail.com; (3) UNISINOS – laisvs@unisinis.br (4) UNISINOS – marlovak@unisinis.br (5) UNISINOS – ftognoli@unisinis.br

## RESUMO

A espectroscopia de reflectância é uma técnica amplamente utilizada, com aplicações, por exemplo, na caracterização de rochas e minerais, solos e vegetação. Porém as pesquisas desta técnica aplicada a construção civil ainda são superficiais. A aplicação da técnica para caracterização de diferentes materiais é devida as mudanças das feições de absorção nos variados comprimentos de ondas, que são específicas para cada material; e com isso é possível reconhecer diferentes composições químicas e até mesmo variações de concentração. Portanto, a utilização desta técnica, para a caracterização de materiais e resíduos com potencial emprego na construção civil, pode se tornar uma alternativa viável em pesquisas e desenvolvimento de novos produtos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o ensaio de espectroscopia de reflectância em materiais cimentícios suplementares e resíduos, observando diferentes comportamentos espectrais. Para tanto, foram utilizados os seguintes materiais: cimento CP-V, clínquer, filer calcário, metacaulim, resíduo cerâmico, cinza volante, cinza de casca de arroz e resíduo da lapidação do vidro. Os resultados mostram que cada um dos materiais estudados possui padrão espectral distinto, corroborando com as diferentes composições químicas. Demonstrando que a espectroscopia de reflectância é uma técnica eficaz para a diferenciação destes materiais, além de ser rápida, eficaz e não destrutiva.

**Palavras-chave:** espectroscopia de reflectância, resíduos, materiais cimentícios suplementares.

## REFLECTANCE SPECTROSCOPY APPLIED TO THE CHARACTERIZATION OF SUPPLEMENTARY CIMENTARY MATERIALS AND WASTES

### ABSTRACT

Reflectance spectroscopy is a widely used technique, with applications, for example, in the characterization of rocks and minerals, soils and vegetation. However, the researches of this technique applied to civil construction seems to be superficial. The application of the technique to characterize different materials is due to the changes in the absorption characteristics of different wavelengths, which are specific to each material; and with this it is possible to recognize different chemical compositions and even variations of concentration. Therefore, the use of this technique, for the characterization of materials and wastes with potential use in civil construction, can become a viable alternative in research and development of new products. The aim of this work was to evaluate the reflectance spectroscopy in supplementary cementitious materials and wastes, observing different spectral behavior. The following materials were used: CP-V cement, clinker, limestone filler, metakaolin, ceramic waste, fly ash, rice husk ash and glass lapidation waste. The results show that each of the studied materials has a specific pattern, corroborating with the different chemical compositions. Demonstrating that reflectance spectroscopy is an effective technique for the differentiation of these materials, in addition to being fast, effective and non-destructive.

**Key-words:** Reflectance spectroscopy, wastes, supplementary cementitious materials.



## **1. INTRODUÇÃO**

A concentração de CO<sub>2</sub> no mundo vem aumentando nas últimas décadas, sendo que a média mensal global apresentou um aumento superior a 40ppm entre os anos 2000 e 2018 <sup>(1)</sup>. Ao estudarmos o processo de fabricação do cimento Portland, verificamos que resultam na emissão de gás carbônico. Estes são indicados como responsáveis por 5 a 7% das emissões de gás carbônico mundiais <sup>(2)</sup>

A redução do fator clínquer pela incorporação de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma estratégia eficaz para a redução dessas emissões, com uma previsão de 37% de redução no fator clínquer até o ano de 2050 <sup>(3,4)</sup>. Os MCS podem ser caracterizados como fileres ou pozolanas, normalmente, provenientes de resíduos de outros ramos de atividade, como o resíduo de cerâmica vermelha e a cinza de casca de arroz. Ao incorporarmos diferentes materiais ao cimento, sua composição química é modificada, podendo acarretar em reações diferenciadas. Portanto, é necessária uma boa caracterização do material a se incorporar.

Ao abrangermos técnicas de sensoriamento remoto, verificamos que sua utilização na área da construção civil ocorre há mais de 30 anos. No entanto, a caracterização e identificação de materiais é ainda limitada, principalmente em relação à utilização de sensores proximais com maior resolução espectral <sup>(5)</sup>. Com o intuito de uma melhor caracterização e utilização de diferentes técnicas, o presente estudo visa avaliar a técnica de espectroscopia de reflectância em materiais cimentícios e resíduos, observando as variações no comportamento espectral.

### **1.1. Caracterização espectral de materiais cimentícios**

A espectroscopia de reflectância é uma técnica que permite caracterizar diferentes materiais, observando as variações nos padrões de reflectância das bandas espectrais em variados comprimentos de onda. Baseia-se no princípio de incidência de iluminação sobre uma determinada superfície e registro do espectro da luz refletida para extração das respostas espectrais que são sensíveis à composição do material estudado. A utilização do espectrorradiômetro para fazer as medições das curvas espectrais permite obter resultados de forma rápida, sem custo elevado e não destrutiva <sup>(6-8)</sup>.

Na área da construção civil verificamos a utilização deste equipamento para diferentes fins. Zahiri et. al. <sup>(5)</sup> utilizaram a caracterização espectral para classificar concretos de acordo com a relação água-cimento e prever a sua densidade. Em estudo realizado por Sridhar et. al. <sup>(9)</sup>, foi investigado o efeito de diferentes práticas construtivas nas características espectrais do concreto. Schneider dos Santos



et. al.<sup>(10)</sup> aplicaram essa técnica para diferenciar a resistência à compressão de materiais cimentícios. No entanto, os materiais suplementares que são incorporados ao cimento não possuem uma caracterização espectral específica.

Em grande parte dos trabalhos que utilizam espectrorradiômetros portáteis o intervalo dos comprimentos de onda dos detectores varia de 0,4 a 2,5 micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). O comprimento de ondas do visível ao infravermelho proximal (VNIR), que corresponde ao intervalo de 0,4 a 1,0 $\mu\text{m}$ , é utilizado para avaliar a presença do íon férrico que é associado a óxidos e hidróxidos. Já o infravermelho de ondas curtas (SWIR), que corresponde ao intervalo de 1,0 a 2,5 $\mu\text{m}$ , indica feições de absorção de hidroxilas e carbonatos <sup>(6)</sup>.

Ao analisar o padrão espectral da presença de água em amostras, nota-se características específicas das bandas próximas a 1,4 e 1,9 $\mu\text{m}$  <sup>(9-11)</sup>. No entanto, a presença de carbonato apresenta suas particularidades principalmente nas bandas próximas a 2,3 $\mu\text{m}$  <sup>(9,12)</sup>. Quando há a identificação de ferro na composição, existe uma diferenciação entre autores. A reflectância característica deste material é representada entre 0,6 e 1,1 $\mu\text{m}$ , e centrada aos 0,85 $\mu\text{m}$  <sup>(9)</sup> ou, para outros autores, no comprimento de onda de 0,54 e 0,84 $\mu\text{m}$ , mas essas variações podem ser referentes a diferentes íons férricos analisados <sup>(13)</sup>. A presença de caulinita pode ser verificada com absorção dupla na banda referente ao comprimento de onda de 2,2 $\mu\text{m}$  <sup>(14)</sup>.

Ao falarmos em concreto, as modificações na reflectância características são em 0,45, 1,38 e 1,85 $\mu\text{m}$  <sup>(9)</sup>. E a hidratação do concreto pode ser verificada acompanhando as bandas entre 1,4 a 1,5 e 1,85 a 2,15 $\mu\text{m}$  <sup>(9)</sup>.

A presença de areia na composição química da amostra aumenta a reflectância total da curva espectral. Isso é justificado pela presença de quartzo, que apresenta alta taxa de reflectância<sup>(10)</sup>. Portanto, a presença de areia composta por quartzo não modifica o comportamento espectral, somente a aumenta a reflectância. Além disso o mineral quartzo apresenta feições diagnósticas nos comprimentos de ondas próximo de 10  $\mu\text{m}$  <sup>(15)</sup>.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

O cimento utilizado para esse estudo foi o cimento Portland V –ARI (CPV). De acordo com a NBR 16697 <sup>(16)</sup>, é permitido de 0 a 10% de material carbonático neste cimento, não contendo adições pozolânicas. O clínquer (CL), proveniente da cidade de Rio Branco, Acre, também foi empregado no estudo.

Os materiais cimentícios suplementares utilizados foram:

- Cinza volante (CV) proveniente da Usina Termoeletrica de Candiota, localizada a sudeste do Rio Grande do Sul.
- Resíduo de cerâmica vermelha (RCV) originário da cidade de Arroio do Meio, localizada no Vale do Taquari, Rio Grande do Sul. O fabricante informou que o processo de queima dos blocos ocorre em temperatura controlada, de 700 a 750°C. Os resíduos foram secos em estufa a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas e submetidos a processos de beneficiamento.
- Metacaulim (MK) comercial.
- Fíler calcário calcítico (FC) proveniente de mineradora da região Jacuí Centro, na cidade de Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul.
- Cinza de casca de arroz (CCA) originária da geração de energia em termoeletrica oriunda da cidade de Alegrete, Rio Grande do Sul.
- Resíduo da lapidação do vidro (RLV) proveniente de uma fábrica de vidros na cidade de Teresina, Piauí.

Os materiais utilizados para esse estudo foram previamente empregados no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio Sinos <sup>(17-19)</sup> e caracterizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais, na Universidade do Vale do Rio Sinos (LCVMat). A composição química, realizada através do ensaio de Fluorescência de Raio-X (FRX), está indicada na Tabela 1.



Tabela 1 - Valores de FRX para os materiais em estudo.

Parâmetros	CPV	CL	CV	RCV	MK	FC	CCA
SiO <sub>2</sub>	16,65	18,01	64,70	58,07	50,83	12,67	95,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,58	4,60	20,97	17,16	37,96	3,59	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,25	2,81	7,50	16,03	3,22	1,70	0,06
MgO	1,88	7,17	1,28	0,62	0,99	1,09	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,05	ND	0,11	0,24	0,12	0,1
SO <sub>3</sub>	2,12	1,15	0,16	ND	ND	ND	0,57
K <sub>2</sub> O	1,57	0,93	1,71	1,11	2,66	0,60	1,01
Na <sub>2</sub> O	1,21	1,69	1,73	0,47	0,12	0,49	ND
CaO	60,92	62,25	1,03	0,56	0,11	44,13	0,33
TiO <sub>2</sub>	0,51	0,21	0,86	2,33	1,16	0,24	0,01
MnO	0,15	0,05	ND	0,26	0,01	0,06	0,2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,01	ND	ND	ND	ND	ND
ZnO	0,04	0,04	ND	ND	ND	ND	ND
SrO	0,36	0,10	ND	ND	ND	0,12	ND
PF	7,65	0,92	0,06	3,28	2,72	35,18	2,13

ND – não detectado

PF – perda ao fogo

O resíduo da lapidação do vidro foi caracterizado somente qualitativamente, devido a não existência de um padrão para esse material no laboratório ensaiado. Os elementos que apresentaram quantidade entre 50% a 5% são o Ca e Si e quantidade inferior a 5% são: Sc, S, Fe, K, Al, Sr. Não apresentando elementos majoritários, com quantidade superior a 50%.

## 2.2. Métodos

A análise das amostras através da técnica da espectroscopia de reflectância foi feita com um espectrorradiômetro de alta resolução SPECTRAL EVOLUTION, modelo SR-3500, que realiza leituras no intervalo de comprimento de ondas do visível ao infravermelho de ondas curtas (0,35 a 2,5µm), registrando os valores de 1019 bandas espectrais. As medições foram feitas nos materiais puros pulverizados, sendo possível assim obter as curvas espectrais com as feições de absorção características de cada amostra.

Utilizou-se aproximadamente 8g de cada amostra para realizar as medições, que foram feitas através de um sensor de contato, que contém uma lâmpada de tungstênio de 5 watts de potência, que é ligado diretamente ao equipamento. As medições foram realizadas conforme a metodologia padrão,



onde se obtém previamente um padrão de referência antes de iniciar as leituras. O equipamento pode ser configurado para que em cada leitura sejam realizadas diversas medidas, tendo como resultado final a médias destas. O tempo da obtenção para cada leitura é de aproximadamente 2 segundos para o aparelho configurado em 30 medidas sucessivas. Foram realizadas três leituras em cada amostra, e a análise final das curvas espectrais é equivalente à média destas três leituras, garantindo assim uma maior confiabilidade nos resultados.

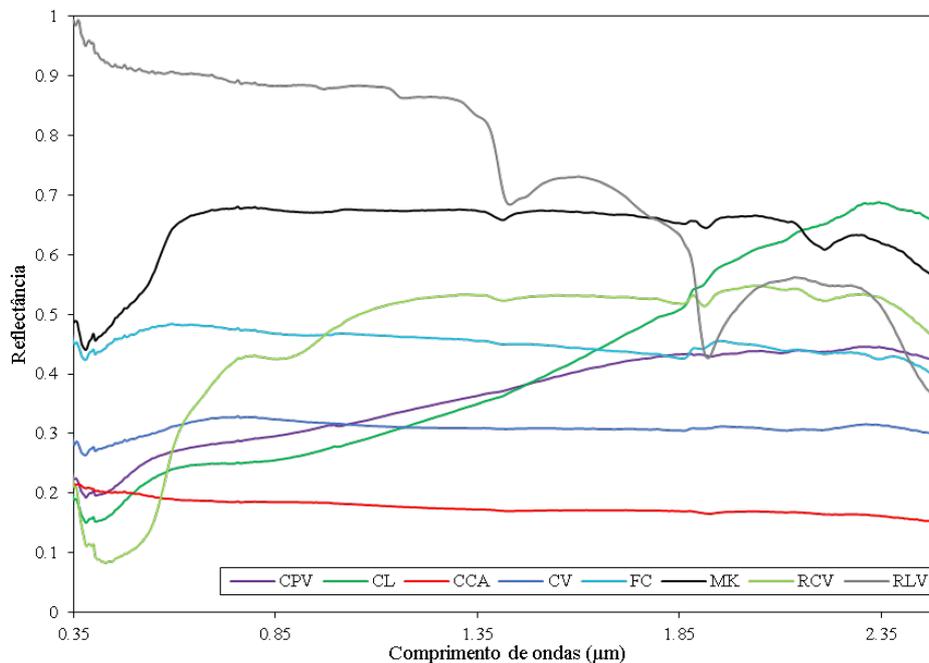
O processamento dos dados utilizando a função de remoção do contínuo, que auxilia nas análises das feições de absorção, foi realizada no software ENVI. As análises gráficas dos dados, que são os valores de comprimento de onda em função da reflectância, para os dados brutos e com remoção do contínuo, foram feitas no software Excel.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma análise inicial dos resultados e interpretação dos dados espectrais de reflectância, gerou-se gráficos que relacionam os valores de comprimento de onda no intervalo de 0,35 a 2,5 $\mu$ m e a reflectância para todas as amostras puras e pulverulentas em estudo (Figura 1). Ao observar o padrão espectral dos 8 materiais nota-se variações nas intensidades de reflectância e diferentes feições de absorção para cada material. A reflectância máxima observada foi na amostra do RLV, com reflectância inicial da curva de 100%. Já a amostra com um padrão geral de baixa reflectância é CCA, que também não conta com feições de absorção pronunciadas.

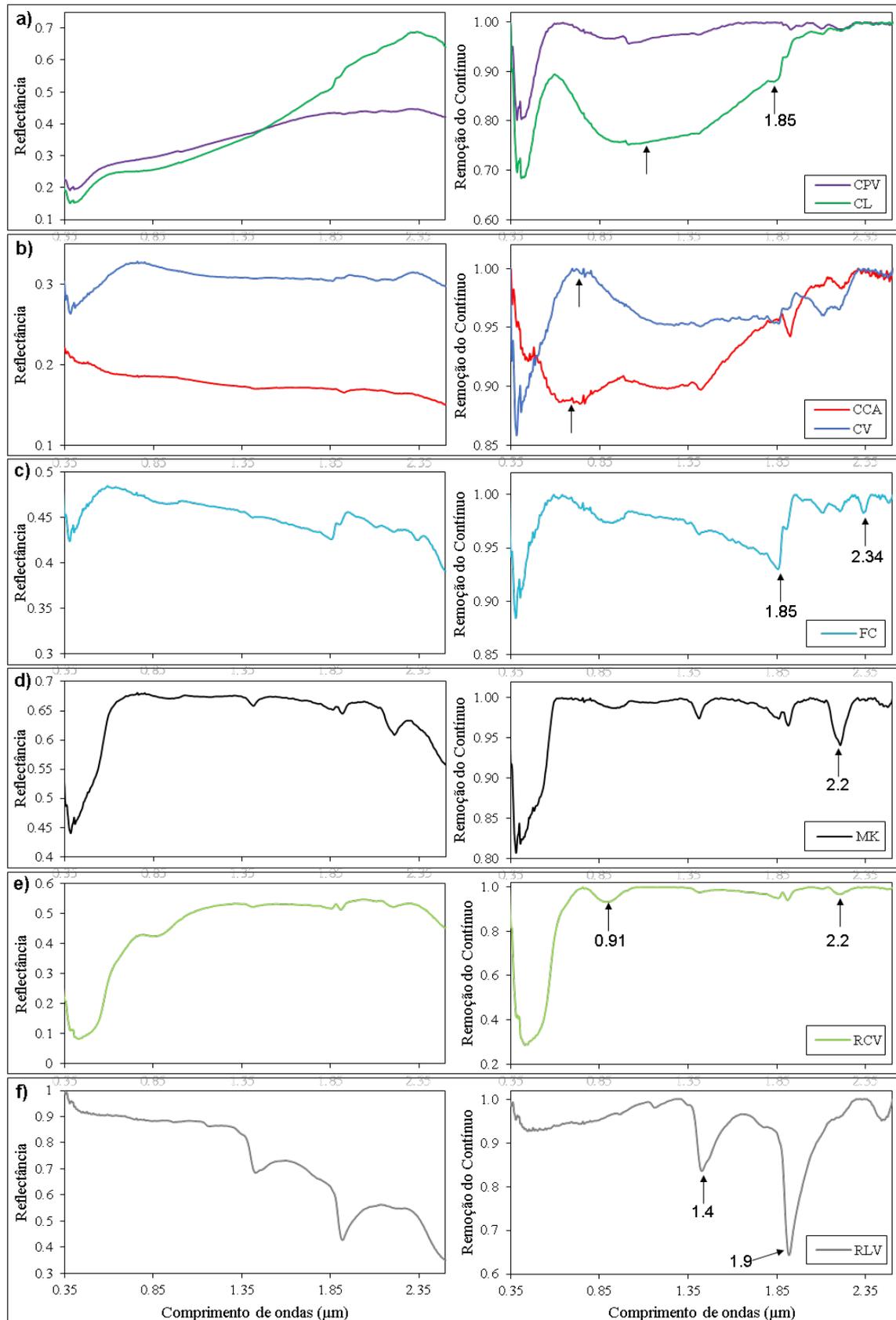
Figura 1 – Curvas espectrais de reflectância dos materiais entre os comprimentos de onda de 0.35 a 2.5 $\mu$ m.



Buscando uma análise mais detalhada de cada curva e a identificação das feições de absorção que caracterizam cada material, foi feita uma análise individual das curvas, comparando o gráfico sem nenhum processamento (somente a relação entre o comprimento de onda e reflectância) e um gráfico com a remoção do contínuo (Figura 2). O processamento de remoção do contínuo isola as feições de absorção e as coloca em uma mesma escala para que elas possam ser comparadas <sup>(6,20)</sup>. Com a remoção do contínuo as feições de absorção ficam em maior evidência, o que facilita identificar a sua posição no comprimento de onda dessas feições e interpretá-las.



Figura 2 – Curvas espectrais de reflectância (esquerda) e de remoção do contínuo (direita) com a identificação das principais feições de absorção. a) CPV e CL. b) CCA e CV. c) FC. d) MK. e) RCV. f) RLV.





Ao observar as curvas espectrais das amostras de CPV e CL (Figura 2a), nota-se que um padrão espectral semelhante até aproximadamente  $1,35\mu\text{m}$ . Porém, nos comprimentos de onda superior a esse valor, a amostra CL apresentou um aumento da reflectância, chegando a 70%, enquanto a amostra CPV mostra baixas feições de absorção no SWIR. Essa diferença do padrão espectral ficou evidenciado pela remoção do contínuo. Na curva de remoção do contínuo da amostra CL também foi possível identificar a feição de absorção em  $1,85\mu\text{m}$ , que já foi descrita em amostras de concreto <sup>(9)</sup>. A maior diferença composicional para essas amostras está no teor de MgO (Tabela 1), sendo para o CPV 1,88 e para o CL 7,17, portanto, essa diferença composicional pode ter resultado na mudança do comportamento espectral para a amostra de CL.

As duas amostras de cinza CCA e CV (Figura 2b) apresentam baixa reflectância, com reflectância máxima de aproximadamente 35% na amostra CV. As amostras mostram um padrão espectral semelhante nos comprimentos de onda do SWIR. A principal diferença espectral entre os dois materiais é melhor observada na região do VNIR, onde a CCA inicia com uma reflectância superior em  $0,35\mu\text{m}$  e decresce em direção ao SWIR. Já a CV possui um aumento de reflectância próximo a  $0,85\mu\text{m}$ , com um pequeno decréscimo, que continua constante até o SWIR. Essa oposição no padrão espectral no VNIR ficou melhor evidenciado nas curvas com remoção do contínuo.

A amostra FC (Figura 2c) também mostra um aumento da reflectância no visível, que diminui em direção aos comprimentos de onda do SWIR. Uma das feições de absorção diagnósticas está centrada em  $1,85\mu\text{m}$ , sendo uma feição evidente até mesmo sem a remoção do contínuo, diferente do observado na amostra CL (Figura 2a). Essa feição em  $1,85\mu\text{m}$  é observada em concretos <sup>(9)</sup>, onde foi descrito o padrão espectral do concreto de maneira geral, portanto observando as feições do FC, pode-se interpretar que essa feição já descrita na literatura pode ser referente ao material suplementar FC. Já a outra feição observada está centrada em  $2,34\mu\text{m}$ , sendo que as feições presentes nessa região do comprimento de ondas são características de minerais carbonáticos. No geral, as feições de carbonato podem ser distinguidas pela presença de duas feições espectrais proeminentes em torno dos comprimentos de onda  $2,5-2,55$  e  $2,3-2,35\mu\text{m}$  <sup>(6,21)</sup>. A posição entre essas duas feições diagnósticas varia com a composição do carbonato principal, sendo que diversos estudos buscam a posição exata, principalmente de calcita e dolomita, nesses diferentes comprimentos de onda. Gaffey <sup>(7)</sup> considerou como feição característica para calcita as bandas em  $2,53$  e  $2,33\mu\text{m}$  e para dolomita  $2,51$  e  $2,31\mu\text{m}$ . Como o FC em estudo é calcítico, a feição de absorção se mostrou condizente com o observado na literatura.



A curva espectral do MK (Figura 2d) mostra um aumento da reflectância no visível de aproximadamente 70% que se mantém constante até o SWIR. A feição de absorção diagnóstica com maior expressão está centrada em  $2,2\mu\text{m}$ , pode ser relacionada a hidroxilas e o seu posicionamento e profundidade da feição de absorção indica a qual íon essa molécula está relacionada. Segundo Hunt <sup>(22)</sup> e Clark & Rouch <sup>(20)</sup> a absorção nas regiões próximas a  $2,2\mu\text{m}$  indicam a presença de argilominerais, como montmorilonitas, illitas e caulinitas. Para o mineral caulinita esperava-se uma feição diagnóstica de absorção dupla e bem pronunciada em  $2,2\mu\text{m}$  <sup>(23)</sup>, porém a curva do MK mostrou uma única feição de absorção. Essa mudança pode ser devido à calcinação da amostra pura de caulim, que, com a calcinação ocorre uma mudança na estrutura cristalina da caulinita, com a perda dos hidróxidos.

A amostra RCV (Figura 2e) mostra um aumento da reflectância em direção ao SWIR, que se mantém constante nos comprimentos de onda superior. No VNIR existe uma feição de absorção diagnóstica centrada em  $0,91\mu\text{m}$  e os óxidos de ferro têm características de absorção intensa em comprimentos de onda inferiores a  $1,0\mu\text{m}$  <sup>(21)</sup>. Ao observar a Tabela 1, nota-se que o material RCV é que o que apresenta o maior teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dentre as amostras em estudo. Sherman e Waite <sup>(24)</sup> estudaram as feições diagnósticas que diferenciam esses minerais, como a goetita e a hematita, sendo que a goetita apresenta feições diagnósticas em  $0,917$ ,  $0,650$ ,  $0,480$  e  $0,435\mu\text{m}$  e, a hematita em  $0,885$ ,  $0,650$ ,  $0,530$  e  $0,445\mu\text{m}$ . Com isso, o RCV em estudo apresenta em sua composição o goetita. Existe também uma leve feição de absorção em  $2,2\mu\text{m}$  que pode estar relacionado ao tipo de argila utilizada na fabricação da cerâmica, como por exemplo montmorilonitas ou illitas.

Já na análise da curva espectral referente ao RLV (Figura 2f), é observada uma alta reflectância, chegando a 100% nas bandas iniciais no visível. Isso é justificado pela elevada presença de sílica na sua composição, assim como quando há a avaliação da presença de areia quartzosa. Outro fator característico desta curva, são os picos bem definidos de água, em  $1,4\mu\text{m}$  e  $1,9\mu\text{m}$ , que podem ser explicados pela granulometria inferior à fração silte do material, facilitando a absorção de água estrutural. As feições diagnósticas da molécula de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ocorrem na região do SWIR, e a banda de  $1,9\mu\text{m}$  indica a presença de água molecular ou estrutural na amostra; muitas vezes essa banda está combinada com a banda de  $1,4\mu\text{m}$ , que é característica de hidroxilas (OH) <sup>(6,14,21,22)</sup>.



## **4. CONCLUSÃO**

A espectroscopia de reflectância se mostrou uma técnica eficaz de caracterização dos seis materiais cimentícios suplementares e resíduos em estudo. Foi possível identificar o padrão espectral que caracteriza cada um dos materiais, que são distintos entre si. Notou-se também uma diferença no comportamento do CPV e CL, que reflete a diferença composicional entre os materiais.

Para estudos futuros pretende-se analisar os materiais cimentícios suplementares e resíduos provenientes de outras regiões, a fim de buscar possíveis mudanças no padrão espectral devido as diferentes fontes dos materiais. Verificar a interferência no padrão espectral característico de cada material e como isso observar a mudanças espectrais em concretos e derivados.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o laboratório VIZLab (Multidisciplinary Advanced Visualization Laboratory) que disponibilizou o espectrorradiômetro e ao LCVMat (Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais) da Unisinos onde foram realizadas as análises de caracterização. FMWT agradece ao CNPq (Processo 311204/2017-1).



## 5. REFERÊNCIAS

1. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Global Monitoring Division. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global>> Acesso em 03 de Outubro de 2018.
2. ZHANG, C. et. al. Accounting process-related CO<sub>2</sub> emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways. **Journal of Cleaner Production**, v.184, p. 451-465, 2018.
3. WRAY, P. Straight talk with Karen Scrivener on cements, CO<sub>2</sub> and sustainable development. **American ceramic Society Bulletin**, v. 91, n. 5, p. 47-50, 2011.
4. WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Tecnology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018. 66p.
5. ZAHIRI, Z.; LAEFER D. F.; GOWEN A. The feasibility of short-wave infrared spectrometry in assessing water-to-cement ratio and density of hardened concrete. **Construction and Building Materials**, v.185, p.661-669, 2018.
6. CLARK, R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. **Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing**. New York, p. 3-58, 1999.
7. GAFFEY, S.J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0,35-2,55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. **American Mineralogist**, v.71, p. 151-162, 1986.
8. JARRAD, R. D.; BERG M. D. V. Sediment mineralogy based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy. **Geological Society**, London, Special Publications, v.267(1), p. 129-140.
9. SRIDHAR, B. B. M. et. al. Identifying the effects of different construction practices on the spectral characteristics of concrete. **Cement and Concrete Research**, v.38, p. 538-542, 2008.
10. SCHNEIDER DOS SANTOS R.; ROLIM, S. B. A.; HEPP, F. Application of visible and near infrared spectroscopy in non-destructive evaluation of cement materials. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36:3, p. 917-938, 2015.
11. VENQUIARUTO, S.; BERNARDINO DA SILVA, L.; DAL MOLIN, D. C. C. Influence of preloading-induced microcracking on the durability of concrete produced with different types of cement. **Construction and Building Materials**, v.189, p. 777-786, 2018.
12. KOTTHAUS, S. et. al. Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 94, p. 194-212, 2014.
13. BROOK, A.; BEN-DOR, E. Reflectance spectroscopy as a tool to assess the strength of high-performance concrete in situ. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**, v.2(8), p. 169-188, 2011.
14. CLARK R. C. et. al. High Spectral Resolution reflectance spectroscopy of Minerals. **Journal of Geophysical Research**, v. 95(B8), p. 12,653-12,680, 1990.



15. CLARK, R. N. Reflectance spectra. Handbook of Physical Constants, p. 178-188, 1995.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
17. FERNANDES, A. J. M. M. **Influência do teor de sílica e alumina no comportamento pozolânico de materiais cimentícios suplementares**, São Leopoldo, 2018. 165p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio do Sinos.
18. FRÖHLICH, J. **Estudos de hidratação de cimento composto por argila calcinada e carbonato de cálcio**. São Leopoldo, 2018. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).
19. GUILLANTE P. **Influência da cinza de casca de arroz e do resíduo de cerâmica vermelha na mitigação da reação álcali-agregado**. São Leopoldo, Trabalho de conclusão de curso – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).
20. CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote-sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89(B7), p. 8329-6340, 1984.
21. HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate Minerals. **Modern Geology**, v. 1, p.283-300, 1970.
22. HUNT, G. R. Spectral signatures of particulate minerals in visible and near-infrared. **Transactions-American Geophysical Union**, v. 58(6), p. 553-553, 1977.
23. CLARK, R.N.; et. al. USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007.
24. SHERMAN, D. M.; WAITE, T. D. Electronic spectra of Fe<sup>3+</sup> oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**, v. 70, n. 11–12, p. 1262–1269, 1985.



## **ELEMENTOS TUBULARES DE PAPEL RECICLADO UTILIZADOS COMO ELEMENTO CONSTRUTIVO: UMA POSSIBILIDADE VIÁVEL DE USO DOS RESÍDUOS EM TERMOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL**

**Nathalia Schimidt Dias <sup>(1)</sup>; Bianca Santos Camargo <sup>(2)</sup>; Gerusa de Cássia Salado <sup>(3)</sup>**

(1) Universidade Estadual de Campinas – nathalia.schimidt@hotmail.com; (2) Universidade Estadual de Campinas – bisancam.94@gmail.com; (3) Universidade Estadual de Campinas – gerusa@ft.unicamp.br.

### **RESUMO**

A construção civil é uma atividade de considerável impacto ao meio ambiente pelo consumo desenfreado de matérias primas. Com o intuito de reverter este quadro, atualmente há diversas alternativas a serem recorridas como forma de solucionar a grande produção de resíduos. Além de reduzir o volume de materiais descartados, o reaproveitamento de resíduos de outros setores produtivos traz uma nova perspectiva em relação ao que a construção civil representa. O objetivo deste trabalho é apresentar através de revisão bibliográfica como construções que utilizam tubos de papelão como elemento construtivo, material proveniente de papel reciclado e que provavelmente se tornaria um resíduo pouco utilizado, são viáveis em diversas situações, em termos técnicos, econômicos e de sustentabilidade ambiental. Tomaram-se como base os trabalhos efetuados pelo arquiteto Shigeru Ban e pesquisas desenvolvidas no Brasil há mais de quinze anos. Através da análise concluiu-se que os resultados obtidos são pertinentes não só para profissionais da área da construção, como também de outras áreas, por ser exposto o quão indicado é aplicar o uso do derivado de papel na construção, principalmente por apresentar traços evidentes de sustentabilidade, praticidade e economia, aliados à resistência mecânica e durabilidade, satisfatórias para certos tipos de construções.

**Palavras-chave:** Resíduos na construção, tubos de papelão, materiais reciclados, materiais não-convencionais.

## **TUBULAR ELEMENTS OF RECYCLED PAPER USED AS A CONSTRUCTION ELEMENT: A VIBRANT POSSIBILITY OF USE OF WASTE IN TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY**

### **ABSTRACT**

Civil construction is an activity that has a considerable impact on the environment through uncontrolled consumption of raw materials. With the intention of reversing this situation, there are currently several alternatives to be used to solve the large waste production. In addition to reducing the volume of discarded materials, the reuse of waste from other productive sectors brings a new perspective on what construction represents. The objective of this work is to present, through a bibliographical review, constructions that use cardboard tubes as a constructive element, material from recycled paper and that would probably become a little used waste, are feasible in several situations, in technical, economic and sustainability terms environmental. The work carried out by the architect Shigeru Ban and researches developed in Brazil for more than fifteen years was taken as base. Through the analysis, it was concluded that the results obtained are pertinent not only to construction professionals, but also to other areas, because it is exposed how indicated is to apply the use of the paper derivative in the construction, mainly because there are obvious traces of sustainability, practicality and economy, coupled with satisfactory mechanical resistance and durability for certain types of constructions.

**Key-words:** Waste in construction, cardboard tubes, recycled materials, unconventional materials.



## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os impactos ambientais que vem ocorrendo no planeta são diretamente proporcionais ao crescimento da população. Estes impactos ocorrem principalmente pela necessidade de consumismo do homem, levando a uma alta exploração de recursos naturais e produção de resíduos. Dentre as atividades que causam grandes impactos ao ambiente, a construção civil possui grande representatividade, já que há uma necessidade constante de explorar recursos naturais.

Sabendo-se que os impactos causados pela construção civil são notáveis, o setor hoje procura meios de manejo para a redução do consumo de matéria prima e a produção de resíduos, visando também gerar benefícios econômicos, sendo que a redução vem por meio da reciclagem e reutilização de materiais, minimizando a extração exorbitante <sup>(1)</sup>.

A aplicação de atividades menos impactantes na construção se enquadra na sustentabilidade, iniciativa que efetua em seu meio alterações conscientes, modificando os materiais comuns sem que as necessidades de moradia se alterem <sup>(2)</sup>. Existem diversos resíduos que podem ser reaproveitados, dentre estes materiais há o papel, que é gerado em grandes quantias nos mais variados setores e possui grande potencial de reciclagem <sup>(3)</sup>.

O papel quando reciclado pode se tornar papelão que pode ser aplicado na construção de diversas formas, aplicação esta que vem ocorrendo desde a segunda parte do século XIX, possibilitando que o papelão seja considerado o protagonista em muitas construções <sup>(4)</sup>.

Os tubos de papelão são versáteis, além de possuírem qualidades que possibilitam seu emprego em formas distintas, gerando inúmeras maneiras de construção e tornando-os uma solução economicamente viável. Dentre as construções que utilizam os tubos de papelão, têm-se principalmente as obras do arquiteto Shigeru Ban, as quais são bem interessantes e vem sendo desenvolvidas até os dias de hoje <sup>(5)</sup>.

Hoje é possível identificar a importância da sustentabilidade e o uso de materiais alternativos (como os tubos de papelão provenientes de reciclagem ou não) empregados na construção civil. Diante disso, esta pesquisa tem por intuito apresentar como tubos de papelão que a primeira vista são frágeis e de pouca durabilidade podem ser ótimos elementos de construção, tornando-se uma solução viável tecnicamente para moradia e conforto do ser humano, além de proporcionar resultados animadores em relação a economia e a sustentabilidade ambiental.



## 2. ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE ELEMENTOS TUBULARES DE PAPEL RECICLADO EMPREGADOS EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Um material é considerado bom quando possui boa resistência e bom desempenho<sup>1</sup> na estrutura, contudo, em obras de construção civil esses fatores não podem ser analisados isoladamente, uma vez que esses dois quesitos devem ser associados a outros fatores, como viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental.

Os elementos tubulares de papel são constantemente empregados em diversas obras do arquiteto Shigeru Ban, que executa diversas construções em países como Japão, Alemanha, China, França etc. Nas figuras 1, 2 e 3 mostram-se algumas das obras executadas por Ban.

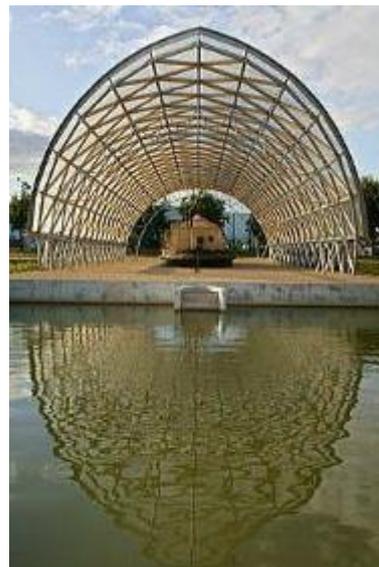
Figura 1 – Construção da Geodésica de papelão<sup>(6)</sup>.



Figura 2– Vista exterior da Cabana Yakushima<sup>(6)</sup>.



Figura 3– Estaleiro do canal de Borbonha<sup>(6)</sup>.



Os tubos de papelão podem ser uma solução viável tecnicamente, desde que se conheçam as características do material como resistência e as técnicas construtivas exigidas para a concepção estrutural. No mais, os elementos tubulares em papelão também são viáveis economicamente, já que são mais baratos que os materiais convencionais como a madeira e o aço, além de serem

---

<sup>1</sup> Estruturalmente, define-se como bom desempenho quando o material é capaz de manter-se em plenas condições de utilização durante toda a sua vida útil de projeto, ou seja, o material não deve apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente a estrutura projetada.



sustentáveis, pois podem ser facilmente reciclados após a utilização e durante o período de execução da obra geram construções limpas e que não causam grandes impactos ambientais <sup>(4)</sup> <sup>(7)</sup>.

## 2.1. Viabilidade técnica

Os grandes volumes de papéis descartados podem gerar tubos de papelão, que são elementos de grande resistência devido ao seu formato tubular, fornecendo assim mais uma opção de material para utilização na construção civil <sup>(8)</sup>.

A utilização de tubos de papelão como principal elemento estrutural vem desde a década de 70, quando Lev Zetlin construiu uma ponte com tubos de papelão, sendo estes alocados de maneira transversal e capazes de resistir a um carregamento de até 8 tf <sup>(9)</sup>.

Em 2002, alunos de uma escola na Europa construíram um pavilhão musical. A construção de caráter permanente foi concebida para durar 20 anos e constituída por 90% de materiais reciclados <sup>(10)</sup>.

Dentre os profissionais que utilizam esse material, Shigeru Ban é o mais conhecido quando se trata da concepção de obras com tubos de papelão, contudo a Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda, dispõe de algumas pesquisas com o material, empregando-os como elemento estrutural (vigas e pilares) ou vedação vertical <sup>(11)</sup>.

Com relação ao Brasil, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos desde 2003. Inicialmente, a proposta para utilizar tubos de papelão foi feita no trabalho de conclusão de curso desenvolvido por Salado, sendo um projeto de um Centro Cultural na Zona Norte (SP), empregando o papelão como material de vedação <sup>(8)</sup>. No mesmo ano, alunas da USP desenvolveram um projeto com a proposta de utilização de papelão para a estrutura, cobertura e vedação de casas para a Vila dos Ferroviários na cidade de Campinas, contudo o mesmo não foi construído <sup>(12)</sup>.

Continuando os estudos no Brasil nos anos de 2006 a 2015, Salado estudou as tipologias construtivas criadas pelo arquiteto japonês, bem como as características técnicas dos tubos de papelão e sequencialmente desenvolveu painéis modulares compostos por tubos de papelão para vedação vertical, onde testou-se a resistência mecânica e o comportamento dos elementos quando submetidos às principais ações sofridas por um painel de vedação vertical, além de avaliar o seu desempenho frente a intempéries e situações reais de exposição <sup>(4)</sup> <sup>(7)</sup> <sup>(13)</sup>.



Em 2017, Dias realizou alguns estudos com tubos de papelão diferentes dos encontrados na literatura, dessa forma, pôde-se comprovar a resistência à compressão do material com diâmetro e espessura diferentes dos ensaios abordados nos estudos de Salado <sup>(14)</sup>. Os ensaios foram realizados para corpos-de-prova (CPs) com alturas de 190 e 950 mm, conforme demonstrado respectivamente nas figuras 4 e 5.

**Figura 4 - Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à compressão <sup>(14)</sup>.**



**Figura 5 - Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência <sup>(14)</sup>.**



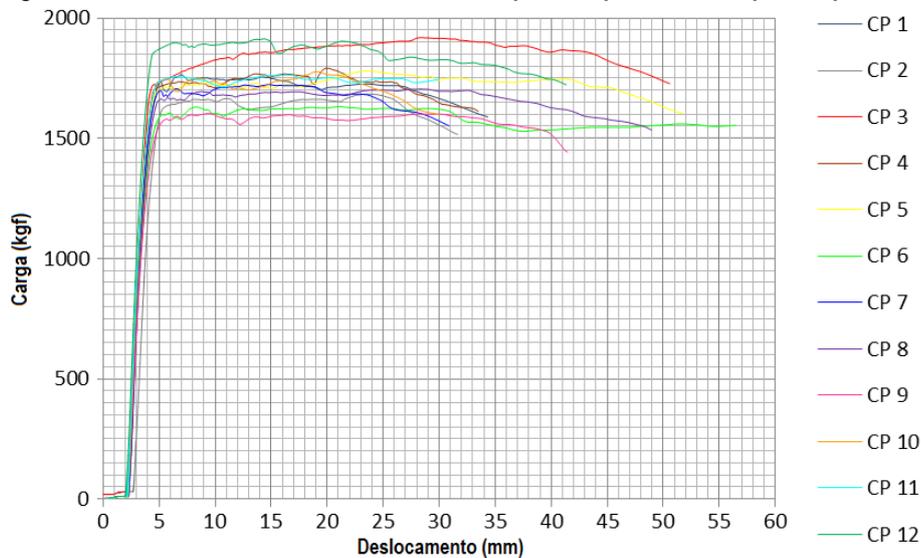
O primeiro ensaio foi guiado pela NBR 5739 (ABNT, 1994) - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, a qual determina que os corpos-de-prova cilíndricos utilizados no ensaio de compressão axial devem possuir altura ( $h=190$  mm) equivalente ao dobro de seu diâmetro ( $d_{\text{externo}}=95$  mm). Foram ensaiados 12 tubos de papelão, sendo todos com 10 mm de espessura e 75 mm de diâmetro interno <sup>(14)</sup>.

Para a realização deste ensaio, o carregamento utilizado foi constante de 0,01 MPa/s. Atribuiu-se o valor de 0,01 Mpa/s para que a velocidade e a carga aplicada fossem bem baixas, de forma que não comprometesse o ensaio, uma vez que quando a velocidade é muito alta ocorre o esmagamento do CP. Dessa forma, o ensaio visava a demonstração da deformação lenta do material <sup>(14)</sup>.

A figura 6 mostra o gráfico de carga x deslocamento após a realização de compressão axial nos corpos de prova com 190 mm de altura.



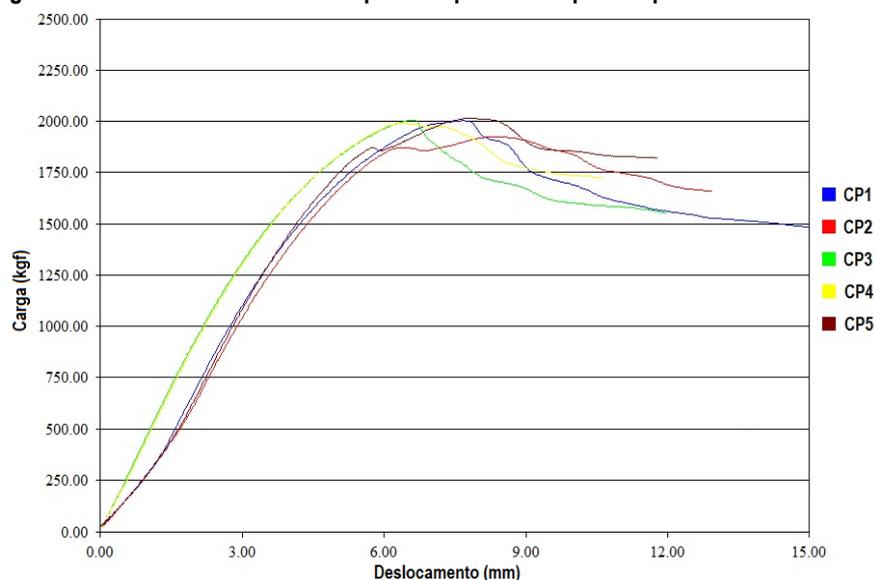
Figura 6 - Gráfico do ensaio de resistência à compressão para os 12 corpos-de-prova <sup>(14)</sup>.



Após análise dos dados do gráfico anterior, Dias ressaltou que os corpos-de-prova tiveram um comportamento parecido (valores de carga entre 1580 e 1896 kgf até o final do regime elástico). Os valores foram considerados satisfatórios analisando o material, a densidade e a espessura <sup>(14)</sup>.

Posteriormente, ensaiou-se cinco corpos-de-prova com dimensões de 95 x 950 mm, sendo estes valores para diâmetro externo e altura, respectivamente, verificando assim a estabilidade do material e a resistência à compressão axial. Para este ensaio, atribuiu-se uma velocidade de carregamento bem baixa para que a carga fosse aplicada de forma bem lenta e não comprometesse o ensaio. A velocidade de aplicação de carga foi de 1,0mm/min <sup>(14)</sup>. Na figura 7 pode-se ver o gráfico de carga x deslocamento após a realização do ensaio.

Figura 7 - Gráfico do ensaio de compressão para os corpos-de-prova com 950 mm <sup>(14)</sup>.





Os valores de carga máxima mantiveram-se entre 1925 e 2016 kgf (até o final do regime elástico), tais valores podem ser considerados satisfatórios considerando a altura do corpo-de-prova, o material, a densidade e a espessura <sup>(14)</sup>.

Além do mais, não foi identificada qualquer proporcionalidade entre os valores obtidos para os ensaios com corpos-de-prova com alturas de 190 e 950 mm, visto que os valores de carga máxima suportada foram relativamente próximos. Além disso, não foram identificadas flechas nos tubos com 950 mm já que o deslocamento horizontal máximo (após a leitura no extensômetro) foi de aproximadamente 4 mm, não havendo, dessa forma, perda de estabilidade <sup>(14)</sup>.

Para definir se um material é viável tecnicamente, deve-se avaliar algumas propriedades mecânicas como tração e compressão ( $\sigma$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ), máxima deformação ( $\epsilon$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e módulo de cisalhamento ( $G$ ). Na tabela 1 pode-se verificar essas propriedades quando o carregamento é paralelo as fibras que compõem o papelão ou perpendicular a elas <sup>(11)</sup>.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do papelão <sup>(11)</sup>.

	<b>E</b>	<b><math>\sigma_t</math></b>	<b><math>\sigma_c</math></b>	<b><math>\epsilon_t</math></b>	<b><math>\epsilon_c</math></b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>G</b>
	[GPa]	[Mpa]	[Mpa]	[%]	[%]		[GPa]
MD	2 - 20	15 - 45	$1/3 * \sigma_{t,MD}$	1.5 – 2.5	$1/4 * \epsilon_{t,MD}$	0.4	$1/3 * (E_{MD} E_{CD})^{1/2}$
CD	$1/4 - 2/3 * E_{MD}$	$1/3 - 1/2 * \sigma_{t,MD}$	$1/2 * \sigma_{c,MD}$	3.0 – 4.0	$1/5 * \epsilon_{t,CD}$	0.1	

t = tração

c = compressão

MD = direção paralela

CD = direção perpendicular

Dessa forma, pode-se afirmar que após a análise dos dados obtidos nos ensaios e com base nos valores apresentados na tabela acima, os tubos de papelão constituem uma solução viável tecnicamente, uma vez que apresentam boa resistência a compressão e tração, considerando-se as características do material, como a densidade e a espessura.

Além das características do comportamento do material quando submetidos a determinados carregamentos, outro fator importante para a análise da viabilidade técnica é a durabilidade. No caso do papelão, a resistência e rigidez do material são fortemente influenciadas pela facilidade com a qual a umidade penetra. O papelão por ser um material hidrocópico, tem facilidade para absorver água (inclusive da atmosfera) e diante disso faz-se necessário aplicar tratamentos químicos para impermeabilização do material para evitar a absorção de água e consequentemente o enfraquecimento e a deformação excessiva do material <sup>(11)</sup>.



Observando as obras de Shigeru Ban e as pesquisas desenvolvidas, nota-se que o tubo de papelão possui potencial para compor um sistema estrutural leve e ao mesmo tempo durável e resistente, capaz de suportar os esforços atuantes na estrutura e redirecioná-los à fundação.

## 2.2. Viabilidade econômica

Devido aos problemas encontrados pela geração de Resíduos de Construção Civil (RCC), tem-se pensado em soluções para minimizar o impacto ambiental. Atualmente, existem várias tecnologias empregadas para a reciclagem total ou parcial dos resíduos da construção civil com viabilidade econômica, já que é possível reduzir os custos na compra e extração matéria prima <sup>(15)</sup> <sup>(16)</sup> <sup>(17)</sup>. Dessa forma, a utilização do RCC deixa de ser um problema e torna-se uma opção sustentável, minimizando a extração dos recursos naturais <sup>(18)</sup>.

Além de reduzir o consumo de recursos naturais, a reciclagem de resíduos contribui para a preservação do meio ambiente, já que se diminui o risco de contaminação do solo e dos lençóis freáticos, como também se diminui o consumo de energia para a produção de novos materiais. No mais, ao diminuir os custos de produção dos materiais utilizados na construção, pode-se reduzir significativamente o custo final das habitações <sup>(19)</sup>.

A relação entre os materiais e a arquitetura é um constante desafio, já que buscam-se constantemente soluções mais ecológicas e viavelmente econômicas, que atendam às características exigidas em cada projeto <sup>(20)</sup>.

Em obras de construção civil, o custo é um grande desafio enfrentado pelos projetistas, pois não é simples obter uma solução que atenda a todos os requisitos e exigências com qualidade e ainda seja viável economicamente <sup>(14)</sup>.

Diferentemente dos outros materiais de construção como, por exemplo, o aço que necessita de processos complexos para a sua fabricação e reciclagem; o papelão é um resíduo abundante no mundo todo e não necessita passar por nenhum processo de transformação para ser reciclado, tornando-o bastante atrativo do ponto de vista econômico <sup>(4)</sup>. Dessa forma, o papel pode ser reciclado e gerar tubos de papelão com aplicação na construção civil, sendo elementos de baixo custo e que geram pouco impacto ambiental, tornando-os uma alternativa sustentável e viável economicamente <sup>(21)</sup>.

Os tubos de papelão podem compor obras com custo relativamente menor quando comparadas as construções com materiais convencionais devido ao material reciclado, rapidez para execução das



obras e não necessitam de outros acabamentos para a sua finalização, apenas a sua impermeabilização. Entretanto, deve-se avaliar outros quesitos como dimensão da obra e os materiais associados para o encaixe entre os tubos, já que obras maiores necessitam de uma grande quantidade de pessoas e o encaixe pode ser feito por elementos de madeira ou aço, podendo aumentar significativamente o custo final da construção <sup>(7)</sup>.

Para que um material seja considerado viável economicamente devem-se considerar fatores como a disponibilidade de matérias-primas e o consumo de água em cada fase do ciclo de vida do material, bem como a sua origem, já que a escolha de materiais fabricados localmente impulsiona as economias regionais e limita os custos com transporte <sup>(20)</sup>.

Na tabela 2 demonstram-se os valores da tabela SINAPI <sup>(22)</sup>, comparando-se os custos dos materiais utilizados para a construção de pilares com 3 m de altura em madeira, aço e concreto. Frisa-se que nesta tabela são apresentados apenas os valores dos materiais, ou seja, excluiu-se o valor de mão de obra para execução ou outros elementos estruturais necessários, como fundações.

Tabela 2 – Estimativa de custo para pilares de madeira, concreto e aço <sup>(22)</sup>.

Código	Descrição do material	Un.	Custo/un.	Custo	Custo Total
35276	PILAR DE MADEIRA NAO APARELHADA 20 X 20 CM, MACARANDUBA, ANGELIM OU EQUIVALENTE DA REGIAO	M	R\$ 111,49	R\$334,47	R\$334,47
4773	PERFIL "I" DE ACO LAMINADO, "W" 250 X 44,8	M	R\$ 264,29	R\$792,87	R\$792,87
1346	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA PLASTIFICADA PARA FORMA DE CONCRETO, DE 2,20 x 1,10 M, E = 10 MM	M <sup>2</sup>	R\$ 21,82	R\$52,37	
34493	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C25, COM BRITA 0 E 1, SLUMP = 100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	M <sup>3</sup>	R\$ 250,03	R\$30,00	
92776	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 6,3 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	Kg	R\$ 11.18	R\$ 27,95	R\$ 171,37*
92778	ARMAÇÃO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	Kg	R\$ 8.25	R\$61,05	

\* valor calculado para um pilar com seção transversal de 20 x 20 cm.

Com relação aos tubos de papelão, não foram encontrados valores na tabela SINAPI, contudo em 2011 foram desenvolvidos alguns painéis modulares compostos por tubos de papelão para vedação vertical, testando a sua resistência mecânica. Além da análise técnica, foi realizado um comparativo entre custo e tempo de execução entre a solução desenvolvida e os métodos convencionais (alvenarias e painéis cimentícios e de gesso acartonado) utilizados para vedação vertical. Segundo a autora, a economia dos custos pode chegar a 33% e o tempo de execução pode ser reduzido em 82%, considerando-se a execução da vedação com alvenaria em uma parede externa com 19 cm de espessura e utilizando-se bloco cerâmico furado de 9 cm x 19 cm x 19 cm <sup>(7)</sup>.



Sendo assim, considerando-se os dados acima, nota-se que o papelão pode ser uma solução viável economicamente, já que sua aplicação e execução apresentam um custo bastante inferior aos principais métodos construtivos para fechamento vertical, executados no Brasil. No mais, frisa-se que apesar da diminuição dos custos, o material ainda apresenta a qualidade mínima exigida para a concepção de diversas obras, o que viabiliza sua aplicação na construção civil.

### **2.3. Sustentabilidade ambiental**

Além dos termos técnicos e econômicos que se atribuem positivamente as obras de Shigeru Ban, a sustentabilidade é uma característica muito importante e que se faz presente em suas obras. A relação de força e sustentabilidade depende da técnica e do quão duradouro o material é, possibilitando enxergar que os três pontos (econômico, técnico e de sustentabilidade) estão interligados entre si <sup>(23)</sup>.

A sustentabilidade, termo que surgiu para que houvesse remediação dos impactos ambientais em geral pensando nas gerações futuras que deveriam ter o mesmo direito a um meio ambiente saudável que as gerações atuais, é também voltada a construção civil. Seu intuito é procurar maneiras de desenvolver projetos de menor impacto ambiental, com a escolha correta de materiais e um sistema de construção que se adeque ao meio, considerando os impactos que as escolhas podem acarretar, além de analisar se há um satisfatório desenvolvimento energético e se a localização pode interferir nas características relevantes da edificação <sup>(24) (25)</sup>.

Dentre os impactos causados ao meio ambiente por meio da construção civil, o que mais se destaca é o consumo de energia exacerbado em todo o processo, desde a extração até o processo final, ameaçando constantemente o esgotamento de matéria prima, sendo o grande empecilho para que seja possível o desenvolvimento sustentável. Como o desenvolvimento sustentável se depara com alguns obstáculos foram criados planos de desenvolvimento e aplicações que devem reverter este quadro, instruindo o seguimento de regras a serem acatadas para a exploração e a distribuição de recursos <sup>(2) (26)</sup>.

Atualmente pesquisadores com um olhar diferente dos antecessores, que visavam somente o ganho e o desenvolvimento, vêm estudando avanços com um olhar sustentável, com a pretensão de respeitar o meio ambiente e os seres que ali habitam, levando assim os edifícios a terem um ciclo de vida diferente, possibilitando melhor vida útil e a diminuição de impactos que a construção poderia causar <sup>(23) (2)</sup>.



Para que a construção seja sustentável é de suma importância que sejam feitas construções com o uso racional de matérias primas e um uso mais intenso de materiais recicláveis e reutilizáveis, porém, estes materiais devem ser escolhidos de acordo com o meio, sendo necessário levar em consideração a origem dos materiais, se há a emissão de poluentes, a qualidade e durabilidade do material, dentre outras características que podem apontar se a obra é ou não sustentável <sup>(26)</sup>.

A intenção das construções sustentáveis é fazer com que os impactos sejam proporcionais aos pontos positivos formando um equilíbrio entre os resultados positivos e negativos. Uma das maneiras em que a sustentabilidade pode ser aplicada é através da reciclagem de materiais que não são usuais na construção civil como: pneu, isopor, garrafa PET, lata, papelão etc., que são introduzidos no ciclo da construção substituindo outros materiais, porém não são somente estes os pontos abordados, sendo necessário ter uma análise muito mais detalhada da construção para concluir se a mesma é sustentável ou não <sup>(27)</sup>. Na Conferência Mundial sobre Construções Sustentáveis, que foi sediada nos Estados Unidos da América em 1994, foram estipulados alguns princípios necessários para que a construção seja sustentável, sendo eles os citados a seguir <sup>(28)</sup>:

- Fazer o uso de recursos renováveis e recicláveis;
- Intensificar a reutilização de recursos;
- Moderar o uso de recursos;
- Preservar o ambiente natural;
- Criar um ambiente salubre;
- Impulsionar alta qualidade ao desenvolver o ambiente construído.

Como já mencionado, o papelão é um dos materiais que podem ser reutilizados na construção civil. Como nas obras efetuadas por Shigeru Ban e dependendo da forma de aplicação, o papelão pode tornar a construção sustentável, já que além de ser reutilizado deve também se enquadrar nos princípios da Conferência Mundial sobre Construção Sustentável.

As construções que provém dos estudos de Shigeru Ban tornam a construção civil mais sustentável por reduzir os resíduos sólidos gerados nas obras, porém não é somente este ponto que atribui este título a estas construções, pois é necessário ir mais a fundo analisando outros pontos que são de interesse comum a toda a população interessada em sustentabilidade na construção civil <sup>(29)</sup>.



Analisando algumas obras em que Shigeru Ban utiliza os elementos tubulares de papelão como matéria primordial é possível identificar e apresentar pontos que o tornam sustentável. Uma das obras construídas por Shigeru Ban escolhida para análise foi a igreja católica situada em Kobi, no Japão. A obra construída em 2007, com o intuito de substituir uma anterior de caráter temporário, conscientizou a todos ao entorno, introduzindo educação ambiental para a população, abordando a eficiência de materiais simples com alta durabilidade e que apresentam uma considerável economia, considerando-se o valor que seria aplicado em uma construção convencional <sup>(30)</sup>.

Outra obra que pode representar a sustentabilidade no uso de tubos de papelão é a uma construção realizada em 2010, que possuiu atributo de ato humanitário, pois foi desenvolvida no Haiti após um terremoto. Nesta construção, Ban em conjunto com voluntários construiu 50 abrigos compostos por tubos de papelão e outros materiais locais, sendo todos reciclados, tendo baixo investimento e alta consciência social. Os abrigos temporários do Haiti além de estabelecerem um refúgio à população desabrigada, ainda detinham a facilidade de serem desmontados após o fim do seu uso <sup>(30)</sup>.

Mais recentemente, em 2016, Ban efetuou outra obra de cunho social, construindo abrigos com tubos de papelão para a população do Equador que foi atingido por um forte terremoto. O arquiteto buscou atender as necessidades de orçamento local, e ainda assim possibilitou à população desabrigada um ambiente de moradia temporário para aliviar a situação de emergência.

Com o uso dos tubos de papelão, Ban pôde produzir não só as construções citadas, mas também outras dezenas de edificações, viabilizando a introdução da educação ambiental a diversos povos e culturas através do emprego de um produto reciclável, que teria por destino o descarte em aterros. As obras de Ban incentivam e intensificam o uso um material não convencional, que é de fácil acesso, estando disponíveis em todos os lugares do mundo, deixando de lado o uso exacerbado de matérias primas usuais.

Além da educação ambiental que ocorre para toda a população beneficiada, com a aplicação do papelão reciclado é possível um remodelamento do uso de recursos, fazendo com que este seja procurado em diversas situações. Dessa forma, possibilita-se a preservação de um ambiente que não seria preservado com o uso de outros materiais, e através da preservação é possível gerar um ambiente salubre, trazendo qualidade para toda a população em geral.



### 3. CONCLUSÕES

A partir de pesquisas em fontes renomadas e tomando por base os trabalhos criados e desenvolvidos por Shigeru Ban, foi possível identificar que suas construções com elementos tubulares em papelão são estáveis e resistentes. Mesmo com a utilização de um material visto como sensível, os tubos de papelão são uma solução viável em termos técnicos e podem ser aplicados em diversas obras. Mesmo com diâmetros e espessuras relativamente pequenas, possuem boa resistência e bom desempenho estrutural, além de serem facilmente substituíveis, leves, não requerem tecnologias complexas para serem fabricados e oferecem praticidade no transporte e manuseio.

Além de serem tecnicamente viáveis, os elementos tubulares de papelão podem ser uma opção para problemas econômicos, já que para o seu desenvolvimento e execução na obra, apresentam custo relativamente inferior quando comparado a métodos construtivos convencionais que utilizam, por exemplo, concreto, madeira ou aço.

Por fim, através da análise feita nas obras de Ban foi possível entender que além de desenvolver seu estudo pensando na alta qualidade de suas obras e na economia pela escolha do material, estas construções também apresentam diversas características que a tornam sustentável, já que pensa-se no meio ambiente e na população que habita em seu entorno, além da utilização de um material que pode ser reutilizado e reciclado.

Dessa forma, conclui-se que o papelão é viável tecnicamente, economicamente e ambientalmente, já que uma obra não pode ser considerada completa em excelência se não houver a presença dos três pontos analisados.



## 4. REFERÊNCIAS

1. RIBEIRO, D.; MOURA, L. S.; & PIROTE, N. S. **Sustentabilidade: Formas de Reaproveitar os Resíduos da Construção Civil**. Revista de Ciências Gerenciais, 2016. Disponível em <http://revista.pgsskroton.com.br/index.php/rcger/article/view/3880/3230>. Acesso em 15 de fevereiro de 2019.
2. SIMAS, L. S. L.; SANTANA, L. C. **Construção Sustentável - Uma nova modalidade para administrar os recursos naturais para a construção de uma casa ecológica**. Cairu em Revista, p.06-14, 2012. Disponível em: [https://www.cairu.br/revista/arquivos/artigos/2012\\_2/11\\_Construcoes\\_Sustentaveis\\_Leonardo\\_Simas\\_140\\_162.pdf](https://www.cairu.br/revista/arquivos/artigos/2012_2/11_Construcoes_Sustentaveis_Leonardo_Simas_140_162.pdf). Acesso em 17 de fevereiro de 2019,
3. GRIGOLETTO, I. C. **Reaproveitar e reciclar o papel: proposta de conscientização da preservação ambiental**. (Monografia de especialização). Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2011.
4. SALADO, G. C. **Construindo com tubos de papelão: um estudo da tecnologia desenvolvida por Shigeru Ban**. Dissertação (mestrado). São Carlos: Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.
5. McQUAID, M. **Shigeru Ban**. Nova York: Phaidon Press, 2003.
6. JODIDIO, P. **Shigeru Ban: Complete Works 1985-2015**. Taschen, 2015.
7. SALADO, G. C. **Painel de vedação vertical de tubos de papelão: estudo, proposta e análise de desempenho**. Tese (doutorado). São Carlos: Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 2011.
8. SALADO, G. C. **Diferentes Alternativas de Materiais e Técnicas Construtivas**. Trabalho Final de Graduação. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2003.
9. MINKE, G. **Bauen mit paper**. In Alternatives Bauen. Kassel (Alemanha). 1980.
10. SLESSOR, C. **Folding planes**. The Architectural Review, v211, n1262, abr 2002, p.56-7. Londres: Emap Construct.
11. EECKOUT, M. *et al.* **Cardboard in architecture**. Holanda: IOS Press, 2008.
12. VACCARI, M. **Habitação ecológica e econômica em papel**. In: Anais do III Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (III ENECS). São Carlos, 2003. P. 67-80.
13. SALADO, G. C. **Estudo de resinas para a proteção contra a incidência solar e umidade em painéis de vedação vertical modulares de tubos de papelão**. Relatório (pós-doutorado). São Carlos: Universidade de São Paulo: Instituto de Arquitetura e Urbanismo, 2015.
14. DIAS, N. S. **Estudo e proposta de sistema estrutural com tubos de papelão**. Relatório (Iniciação Científica). Limeira: Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Tecnologia, 2017.
15. ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campinas, São Paulo. 140p. 1997.



16. PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Tese (Doutorado) - São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 218p,1999.
17. CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife.** João Pessoa, PB: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. 134p. 2005.
18. BARBOSA, J. **Destinação dos resíduos sólidos de construção e demolição do Município de Passo Fundo- RS: Desafios e Perspectivas.** Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul. 63p.,2012.
19. MONTEMOR, M. F. G. C; GONÇALVES M. C. H. B.; MARGARIDO F. M. R. C.; COLAÇO, R. A. **C Materiais de construção: guia de utilização.** Lisboa: Loja da Imagem, 2005.
20. COSTA, M. I. S. R. **A descontextualização de objetos correntes para materiais de construção: o caso da aplicação dos tubos de papel de Shigeru Ban.** Dissertação (Mestrado). Lisboa – PT: Universidades Lusíada, 2015.
21. SANTOS, A. A. R. **Tecnologia construtiva utilizando tubos de papelão.** São José dos Campos: Universidade do vale do Paraíba – Univap, XIII SA Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2011.
22. SINAPI – Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil. Disponível em: [http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_664](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_664). Acesso em 23 de agosto de 2019.
23. VACCARI, M. **Environmental Assessment of Cardboard as a Building Material.** MSc in Energy Efficient and Sustainable Building. Oxford: Oxford Brookes University - School of Built Environment, 2008.
24. FREITAS, C. M *et al.* **Problemas ambientais, saúde coletiva e ciências sociais.** Ciência e saúde coletiva, p.137-150, 2003.
25. SATTLER, M. A. **Habitacões de baixo custo mais sustentáveis: A casa alvorada eo centro experimental de tecnologias habitacionais sustentáveis.** Porto Alegre: Coleção HABITARE / FINEP, 2007.
26. WIECZYNSKI, V. J.; SEHNEM, S. **Construções mais sustentáveis: alternativas para uma habitação de baixo custo.** Pinhalzinho, SC, 2014. Disponível em: <http://www.uniedu.sed.sc.gov.br/wp-content/uploads/2015/02/Artigo-Vladimir-Jos%C3%A9-Wieczynski.pdf> Acesso em 17 de fevereiro de 2019.
27. MANHÃES, G. S.; ARAUJO, R. **Sustentabilidade nas construções. Humanas Sociais & Aplicadas,** p.4, 11, 2014.
28. PINHEIRO, M. D. **Construção sustentável: mito ou realidade.** Lisboa: VII Congresso Nacional de Engenharia do Ambiente, 2003. Disponível em [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571242058/PaperAPEA\\_ConstrucaoSustentavel.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571242058/PaperAPEA_ConstrucaoSustentavel.pdf). Acesso em 03 de março de 2019.
29. ASSIS, J. R.; SALADO, G. C. **Tubos de Papelão.** VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Santa Catarina, 2019.
30. CAMARGO, B. S.; SALADO, G. C. **Sustentabilidade no uso de tubos de papelão aplicados na construção civil.** VII Encontro de Sustentabilidade em projeto. Santa Catarina, 2019.



## RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: LACUNAS NO CONHECIMENTO

**Marcus Lobo** <sup>(1)</sup>; **Melissa Lago de Jesus** <sup>(2)</sup>; **João Luiz Calmon** <sup>(3)</sup>.

(1) Universidade Federal da Bahia – lobo-marcus@outlook.com; (2) Universidade Federal da Bahia – melissalago27@gmail.com; (3) Universidade Federal da Bahia – calmonbarcelona@gmail.com.

### RESUMO

Grande consumidora de recursos naturais, a indústria da construção civil possui alta geração de resíduos que são facilmente descartados no meio ambiente. Os resíduos de construção e demolição (RCD) compõem uma parte importante da produção total de resíduos sólidos no mundo, sendo a maior parte disposta em aterros sanitários. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma revisão acerca das pesquisas relacionadas com a utilização de resíduo de construção e demolição no concreto. Para isto, serão desenvolvidas as seguintes etapas: quantificação do resíduo no Brasil e em escala global; tratamento do resíduo de construção e demolição; formas de utilização no concreto; análise bibliométrica fundamentada em bancos de dados como Scopus e Science Direct; levantamento de ensaios realizados buscando identificar as propriedades e parâmetros de durabilidade do concreto que possuem o RCD em sua matriz; tratamento dos resultados coletados e uma análise estatística destes resultados, quando for possível. Sendo assim, espera-se obter como fundamental conclusão as lacunas no conhecimento, apontando assim, campos para continuidade e novas vertentes da pesquisa na área.

**Palavras-chave:** resíduo de construção e demolição, concreto, propriedades, bibliometria, lacunas.

### WASTE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION: KNOWLEDGE GAPS

Large consumer of natural resources, the construction industry has high generation of waste that is easily disposed of in the environment. Construction and demolition wastes (RCDs) make up an important part of the world's total solid waste production, most of which is disposed of in landfills. This work aims to develop a review about the research related to the use of construction residue and demolition in concrete. For this, the following steps will be developed: quantification of waste in Brazil and on a global scale; treatment of construction waste and demolition; forms of use in concrete; based bibliometric analysis on databases such as Scopus and Science Direct; survey of tests carried out in order to identify the properties and parameters of concrete durability that have RCD in its matrix; treatment of the results collected and a statistical analysis of these results, when possible. Thus, it is expected to obtain as a fundamental conclusion the knowledge gaps, thus indicating, fields for continuity and new research strands in the area.

**Key-words:** construction and demolition waste, concrete, properties, bibliometrics, gaps.



## 1. INTRODUÇÃO

Embora seja impulsionadora da economia, a indústria da construção consome grande quantidade de energia e recursos naturais, em que a maioria não é renovável. Ao mesmo tempo, um grande volume de resíduos de construção e demolição é gerado durante o processo de construção, reforma e demolição <sup>(1)</sup>. Com isso, esta indústria é considerada grande geradora de materiais aparentemente inutilizáveis que são descartados como resíduos sólidos <sup>(2)</sup>.

Avalia-se que o setor da construção é responsável pelo consumo de cerca de 40% de todos os recursos naturais disponíveis no planeta e 1/3 destes recursos são convertidos em produtos cimentícios <sup>(3)</sup>. Os EUA produzem anualmente 250 milhões de toneladas de resíduo da construção e demolição (RCD), a China gerou mais de 240 milhões de toneladas de RCD até o final de 2016<sup>(1)</sup>. O Brasil produziu cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos da construção, correspondendo a 57% do total de resíduos sólidos produzidos no país <sup>(4)</sup>.

A escassez de recursos naturais e a geração de RCD em grandes quantidades levaram a uma crescente preocupação com o descarte destes resíduos, sendo assim, o concreto reciclado vem sendo estudado, visto que, pode efetivamente minimizar a exploração de matéria-prima. O concreto reciclado tem sido amplamente utilizado como concreto estrutural e não estrutural em todo o mundo <sup>(5)</sup>. Conforme os autores, a taxa de utilização dos resíduos no concreto reciclado alcançou 80% em alguns países, como Alemanha e Dinamarca.

O uso de resíduos de construção e demolição como agregados na indústria do concreto é uma maneira eficaz de resolver a problemática ambiental acerca da geração destes resíduos, podendo trazer benefícios econômicos e ambientais <sup>(6)</sup>. O concreto reciclado tem sido reconhecido como um meio para poupar recursos e reduzir o espaço ocupado pelo descarte de resíduos. Todavia, a utilização deste concreto ainda não é difundida, mesmo com vários estudos realizados acerca do comportamento do concreto reciclado e com o estabelecimento de parâmetros confiáveis <sup>(7)</sup>.

A produção do concreto reciclado envolve o estudo do conteúdo e da qualidade do agregado reciclado. Os parâmetros deste estudo são determinados pela composição do agregado, pela capacidade de absorção de água e conteúdo de argamassa incorporado. O resultado da análise pode levar a diferentes tipos de agregados reciclados. O agregado reciclado originado do concreto é o agregado mais adequado para a aplicação em concretos estruturais, por conta das suas características favoráveis, sendo baixa a presença de impurezas <sup>(7)</sup>.



A qualidade do agregado oriundo do resíduo de construção e demolição de concreto está associada à origem deste concreto, que se tornou resíduo e pode ser transformado em agregado reciclado. Além disso, o processo de reciclagem também interfere no desempenho do agregado. Considera-se a capacidade de absorção de água um dos melhores parâmetros para definir a qualidade do agregado. Sendo assim, o agregado graúdo reciclado apresenta melhores resultados em relação ao agregado miúdo reciclado <sup>(7)</sup>. Com isso, o objetivo deste estudo é apresentar um estado da arte sobre o uso do agregado graúdo reciclado proveniente do concreto. Este estudo tenta coletar e atualizar dados referentes ao uso do resíduo de construção e demolição por meio de bancos de dados como *Scopus* e *Science Direct* por meio da análise bibliométrica dos estudos que foram feitos nos últimos dez anos (2010 a 2019). Espera-se identificar lacunas no conhecimento para indicar possíveis campos para continuidade e novas vertentes da pesquisa na área.

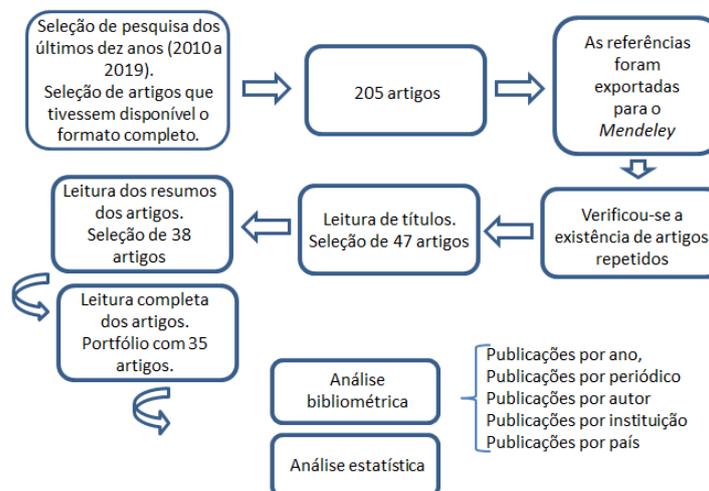
## 2. METODOLOGIA

Considerando a grande quantidade de pesquisas desenvolvidas na área de resíduos da construção e demolição, faz-se necessário aplicar uma metodologia que sistematize a seleção de publicações relevantes ao tema do estudo. Sendo assim, foi aplicada a esta pesquisa a metodologia Proknow-C que possibilita a organização das atividades acerca do alinhamento com o tema de pesquisa, ou seja, esta metodologia orienta os procedimentos para a construção do portfólio bibliográfico <sup>(8)</sup>. Sendo assim, essa técnica tem o objetivo de selecionar e analisar quantitativamente o portfólio <sup>(9)</sup>.

Os artigos utilizados para o propósito desta revisão foram obtidos através dos bancos de dados online, *Scopus* e *Science Direct*. O método de pesquisa está esquematizado na Figura 1. Dessa forma, os critérios de pesquisa aplicados para encontrar os periódicos relacionados com o tema do estudo consistiram na busca por palavras-chave, utilizaram-se as expressões “*construction and demolition waste*”, “*concrete*”, “*properties*”, “*bibliometrics*”, “*gaps*”, “*review*”. Inicialmente foram encontrados 3.639 documentos, para refinar a pesquisa, a busca foi feita dos últimos dez anos (2010 a 2019), e foram selecionados apenas os artigos que tivessem disponível o formato completo. Após refinar a pesquisa, restaram 205 artigos.



Figura 1 – Fluxograma do método da pesquisa.



As referências encontradas foram exportadas para um gerenciador online de referências bibliográficas. A ferramenta utilizada foi o *Mendeley*, em que se verificou a existência de artigos repetidos, com o recurso “*Check for Duplicates*”. Tal verificação é importante, visto que o mesmo artigo pode estar disponível em mais de uma base de dados. Sendo assim, restaram 205 artigos para seleção pela leitura do título.

Na etapa de leitura de títulos, consideraram-se referências alinhadas ao objetivo da pesquisa. Assim, foram selecionados 47 artigos. Após leitura de títulos, foi feita a leitura dos resumos dos artigos, onde foram selecionados 38 artigos para leitura. Procedeu-se então à última verificação acerca do enquadramento dos artigos no objetivo principal da pesquisa que é a construção do estado da arte do uso do agregado graúdo reciclado proveniente do concreto nos últimos dez anos. Deste modo, o portfólio bibliográfico ficou constituído por 29 artigos de pesquisa e 6 artigos de revisão, totalizando 35 artigos.

Depois da leitura dos artigos, a segunda etapa da pesquisa foi a análise bibliométrica, que consistiu na quantificação de alguns parâmetros, como: publicações por ano, publicações por periódico, publicações por autor e publicações por país. Após essa análise, fez-se o aprofundamento nas pesquisas sobre o tema estudado para avaliar estatisticamente os dados coletados.



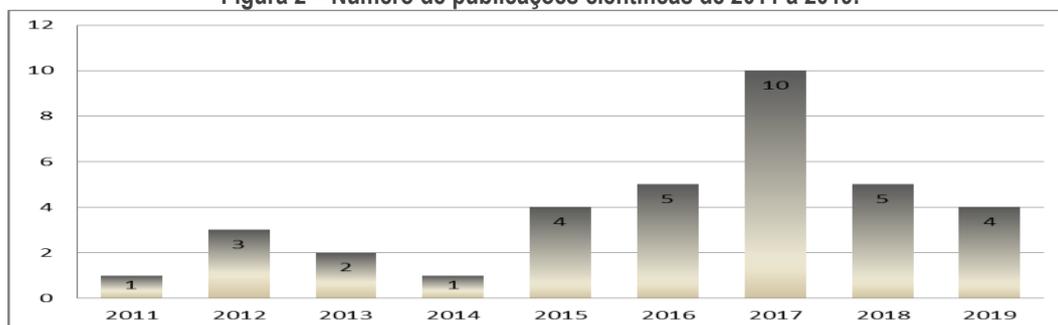
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise bibliométrica

##### 3.1.1. Análise por ano de publicação

Os resultados da quantificação bibliométrica do portfólio bibliográfico são apresentados a seguir. Ao analisar a quantidade de publicações científicas por ano (Figura 2), observa-se que em 2017 foram publicados 10 artigos, abordando o estudo do resíduo de construção e demolição proveniente do concreto como agregado graúdo para aplicação em concreto reciclado com fins estruturais ou não.

Figura 2 – Número de publicações científicas de 2011 a 2019.



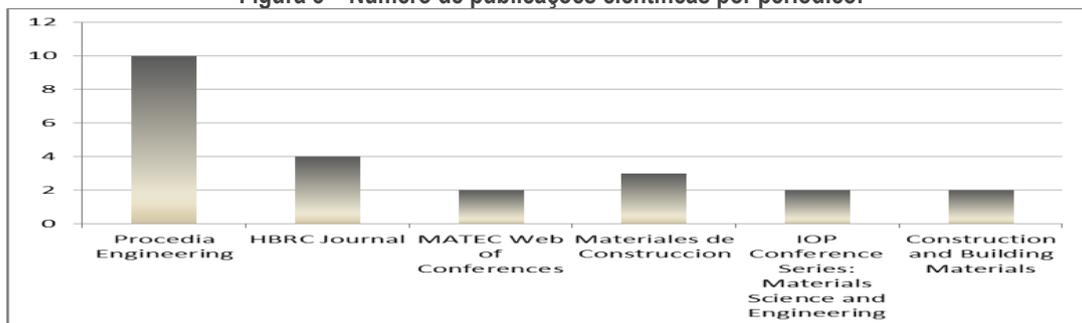
De acordo com a Figura 2, a produção científica aumentou gradativamente entre os anos de 2015 e 2017, tendo 2017 como o ano com maior publicação de artigos. Vale ressaltar que o número de publicações apresentadas neste trabalho abordam apenas as produções que disponibilizaram acesso completo ao artigo, tendo muitas publicações acerca do tema eliminadas por conta do seu acesso restrito. Além disso, o ano de 2019 pode ser avaliado parcialmente, visto que existem estudos em processo de desenvolvimento e publicação.

##### 3.1.2. Análise por periódico

Dentre os periódicos com mais artigos publicados (Figura 3) sobre o tema de estudo, destaca-se a revista “*Procedia Engineering*” com 10 publicações. Nota-se que as pesquisas que compõem o portfólio bibliográfico foram publicadas em 18 periódicos diferentes.



Figura 3 – Número de publicações científicas por periódico.

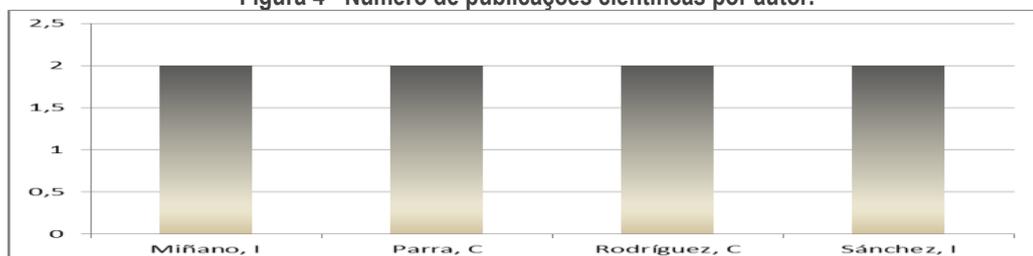


Nota: Para compor o gráfico foram selecionados apenas os periódicos que apresentaram mais de um artigo publicado. Sendo os periódicos com apenas uma publicação: Energy Procedia, Environmental Science and Pollution Research, Indian Journal of Science and Technology, Resources, Conservation and Recycling, Materials, Materials Research, Materiaux et Constructions, Journal of Materials Research and Technology, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Innovative Infrastructure Solutions, Sustainability (Switzerland), Ceramica. Totalizando 18 periódicos.

### 3.1.3. Análise por autor

Quanto a análise dos principais autores que publicaram acerca do tema estudado, pode-se observar os autores apresentados na Figura 4, em que foram considerados no gráfico apenas autores que tiveram mais de uma publicação. O portfólio bibliográfico foi composto por 118 autores, contudo apenas 4 publicaram mais de uma vez.

Figura 4 - Número de publicações científicas por autor.



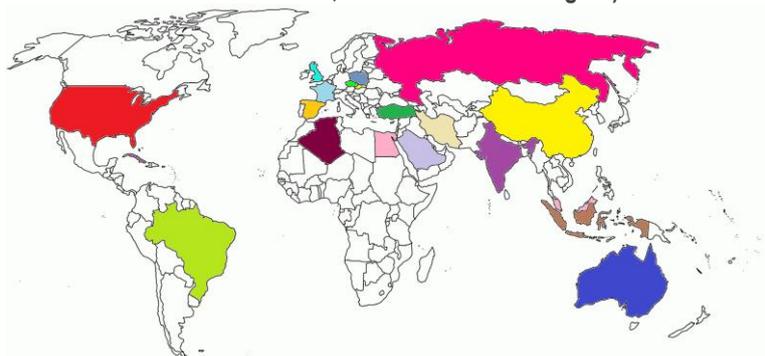
Nota: O portfólio bibliográfico foi composto por 118 autores, 114 autores tiveram apenas uma publicação, são eles: Falek, K; Aoudjane, K; Kadri, E H; Kaoua, F; Krzysztof Zieliński; Kubissa, Wojciech; Jaskulski, Roman; Koper, Artur; Szpetulski, Jacek; Abdel-Hay, Ahmed Shaban; Dodds, Wayne; Goodier, Chris; Christodoulou, Christian; Austin, Simon; Dunne, David; Fawzy, Yasser Abdelghany; Çakır, Özgür; Sofyanlı, Ömer Özkan; Ayob, A; Razali, M E; Alias, S; Ahmad, A G; Ali, D S H; Tri Atmajayanti, A; Daniel Saragih, C G; Haryanto, Y; Venkrbec, V; Nováková, I; Henková, S; Larbi, B; Abdelaziz, M; Miloud, B; Liu, Y; Sun, T; Yang, L; Sánchez-Roldán, Z; Martín-Morales, M; Valverde-Palacios, I; Valverde-Espinosa, I; Zamorano, M; Nováková, Iveta; Mikulica, Karel; Letelier, Viviana; Tarela, Ester; Moriconi, Giacomo; Junak, Jozef; Sicakova, Alena; Senaratne, Sepani; Lambrousis, Gregory; Mirza, Olivia; Tam, Vivian W Y; Kang, Won-Hee; Galitskova, Yulia M; Limarjeva, Elizaveta V; Kabir, Shahid; Al-Shayeb, Ammar; Khan, Imran M; Shahidan, Shahiron; Azmi, Mohamad Azim Mohammad; Kupusamy, Kumanan; Zuki, Sharifah Salwa Mohd; Ali, Noorwirdawati; Pavlů, T; Ghafourian, K; Mohamed, Z; Ismail, S; Malakute, R; Abolghasemi, M; González-Fonteboa, B; Seara-Paz, S; De Brito, J; González-Taboada, I; Martínez-Abella, F; Vasco-Silva, R; Verian, K P; Ashraf, W; Cao, Y; García-González, J; Rodríguez-Robles, D; Juan-Valdés, A; Pozo, J M M; Guerra-Romero, M. Ignacio; Cabral, A E B; Schalch, V; Dal Molin, D C C; Ribeiro, J L D; Xuan, D X; Houben, L J M; Molenaar, A A A; Shui, Z H; Hadavand, B; Imaninasab, R; Benito, F; Cabeza, M; Francisco, J T M; de Souza, A E; Teixeira, S R; Pavón, E; Etxeberria, M; Díaz, N E; Leite, F D C; Motta, R D S; Vasconcelos, K L; Bernucci, L; Wagih, Ashraf M; El-Karmoty, Hossam Z; Ebid, Magda; Okba, Samir H; Ulsen, Carina; Tseng, Ester; Angulo, Sérgio Cirelli; Landmann, Mirko; Contessotto, Renato; Balbo, José Tadeu; Kahn, Henrique; Surya, M; VVL, Kanta Rao; Lakshmy, P.



### 3.1.4. Análise por país

Na Figura 5 apresenta-se a distribuição geográfica dos países em que seus pesquisadores realizaram estudos acerca da pesquisa desenvolvida por este trabalho. Na figura não constam os países cujos pesquisadores trabalharam em cooperação.

Figura 5 - Distribuição geográfica de estudos selecionados (estudos que consideraram mais de um país como área de estudo, foram excluídos da figura).

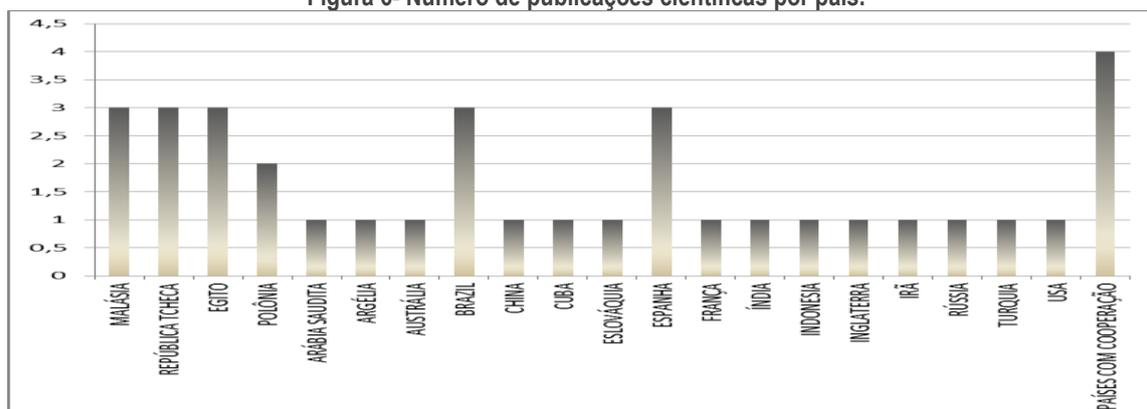


MALÁSIA	3	ARGÉLIA	1	ESLOVÁQUIA	1	INGLATERRA	1
REPÚBLICA TCHECA	3	AUSTRÁLIA	1	ESPAÑA	3	IRÃ	1
EGITO	3	BRAZIL	3	FRANÇA	1	RÚSSIA	1
POLÔNIA	2	CHINA	1	ÍNDIA	1	TURQUIA	1
ARÁBIA SAUDITA	1	CUBA	1	INDONESIA	1	USA	1

Nota: Os países cujos pesquisadores trabalharam em cooperação são: Chile e Itália, Espanha e Portugal, Holanda e China, Brasil e Alemanha.

Observa-se que o maior número de publicações é de países cujos pesquisadores trabalharam em cooperação, tendo quatro publicações relacionadas ao foco da pesquisa. Em seguida estão os países Malásia, República Tcheca, Egito, Brasil e Espanha, com três publicações.

Figura 6- Número de publicações científicas por país.



## 3.2. Análise de dados

### 3.2.1. Principais ensaios



Ao avaliar os artigos selecionados, percebeu-se uma variabilidade nos ensaios realizados pelo programa experimental de cada estudo. Na maioria dos trabalhos, foi avaliada a substituição do agregado graúdo natural (AGN) pelo agregado graúdo reciclado (AGR), chegando até a substituição de 100%. Outros trabalhos apenas caracterizaram o agregado reciclado proveniente de diversas construções, comparando a variabilidade de aspectos físicos e químicos deste agregado. Além disso, o portfólio deste trabalho também levou em consideração artigos de revisão sobre o tema, não tendo esses, programa experimental. Sendo assim, a tabela abaixo apresenta os principais ensaios realizados por 28 artigos, ficando 7 artigos fora da tabela por conta de não terem realizado os ensaios. Vale ressaltar que os ensaios considerados na tabela foram aqueles que constaram em mais de cinco artigos.

**Tabela 1 – Principais ensaios.**

(Continua)

Autores	Propriedades físicas			Propriedades mecânicas			
	Granulometria	Absorção e porosidade	Densidade	Resistência à compressão axial	Resistência à tração por compressão diametral	Abrasão	Módulo de elasticidade
Falek et al. (2017)	X	X		X		X	
Zieliński (2017)	X	X	X	X			
Kubissa et al. (2015)	X	X		X	X		
Abdel-hay (2017)		X		X			
Dodds et al. (2017)	X	X	X	X			
Fawzy (2018)		X		X	X		
Çakır e Sofyanlı (2015)		X		X	X		
Ayob et al. (2016)	X	X		X			
Atmajayanti, G. e Haryanto (2018)	X	X	X	X	X		X
Venkrbec, Nováková e Henková (2017)	X	X	X				
Belagraa, Abdelaziz e Miloud (2015)	X	X	X			X	
Martín-morales et al. (2016)	X	X	X	X			
Rodríguez et al. (2017)	X	X				X	
Nováková e Mikulica (2016)	X	X	X	X	X		
Junak e Sicakova (2017)		X	X	X			
Galitskova e Limarjeva (2015)		X					
Kabir, Al-shayeb e Khan (2016)	X	X	X	X	X	X	
Shahidan et al. (2017)	X	X	X	X	X		
Hadavand e Imaninasab (2019)	X	X	X	X	X	X	
Ulsen et al. (2019)	X	X	X				
Xuan et al. (2011)	X	X	X	X			X
Rodríguez et al. (2019)		X	X	X			



Tabela 1 – Principais ensaios.

(Conclusão)

Autores	Propriedades físicas			Propriedades mecânicas			
	Granulometria	Absorção e porosidade	Densidade	Resistência à compressão axial	Resistência à tração por compressão diametral	Abrasão	Módulo de elasticidade
Surya, Vvl e Lakshmy (2013)		X		X	X	X	X
Wagih et al. (2013)	X	X	X	X	X	X	X
Pavón, Etxeberria e Díaz (2012)	X	X	X	X			
<b>Total</b>	20	27	17	22	10	8	5

Nota: Os ensaios que não constam na tabela foram ensaios relacionados às propriedades da microestrutura e ensaios de durabilidade, foram eles [ensaio (quantidade)]: Microscópio eletrônico de varredura (MEV)(1), resistência à tração na flexão(4), ensaio de gelo degelo(1), ensaio de carbonatação(3), teste de coeficiente de migração de cloretos(1), velocidade de pulso ultrassônico(2), módulo de resiliência(1), ensaio de resistência à sulfatos(1).

### 3.2.2. Análise dos ensaios

Conforme o ensaio selecionado, originou-se um gráfico de dispersão no software *Excel*, em que cada ponto representou um valor encontrado por determinado(s) autor(es), sendo a coordenada abscissa referente à porcentagem de substituição do agregado graúdo natural (AGN) pelo agregado graúdo reciclado (AGR) no concreto e a coordenada ordenada correspondente ao valor relativo da propriedade estudada, isto é, os valores encontrados com a substituição por cada autor em relação aos valores dos corpos de prova de referência correspondente. Esses gráficos são a referência para as discussões presentes nos resultados. Este trabalho avaliou os resultados referentes às propriedades mecânicas que tiveram no mínimo 10 ensaios realizados. Sendo assim, os ensaios selecionados foram resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral. Além da quantidade de trabalhos que realizaram esses dois ensaios, vale ressaltar que essas propriedades, principalmente a resistência à compressão axial, são muito pertinentes na avaliação do desempenho de um concreto.

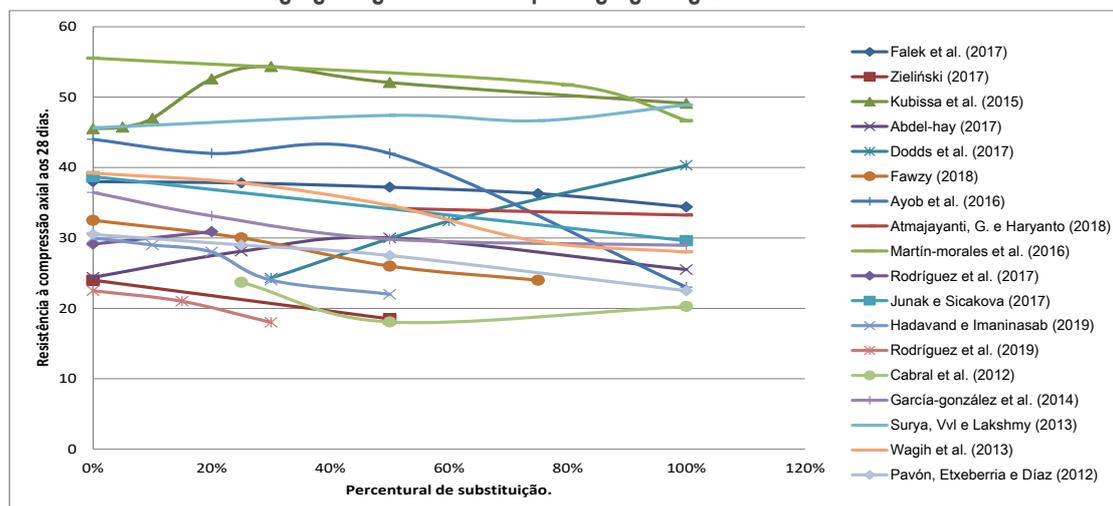
#### 3.2.2.1. Resistência à compressão axial

Dentre os 22 ensaios de resistência à compressão axial, 4 ensaios não puderam ser comparados no gráfico (Figura 7), visto que os autores não utilizaram o agregado graúdo reciclado (AGR) como substituição do agregado graúdo natural (AGN), foram levados em consideração outros parâmetros, como por exemplo, concretos confeccionados com diferentes tamanhos de agregados, concretos com adições minerais, concretos com agregado reciclado submetido a tratamentos na superfície do



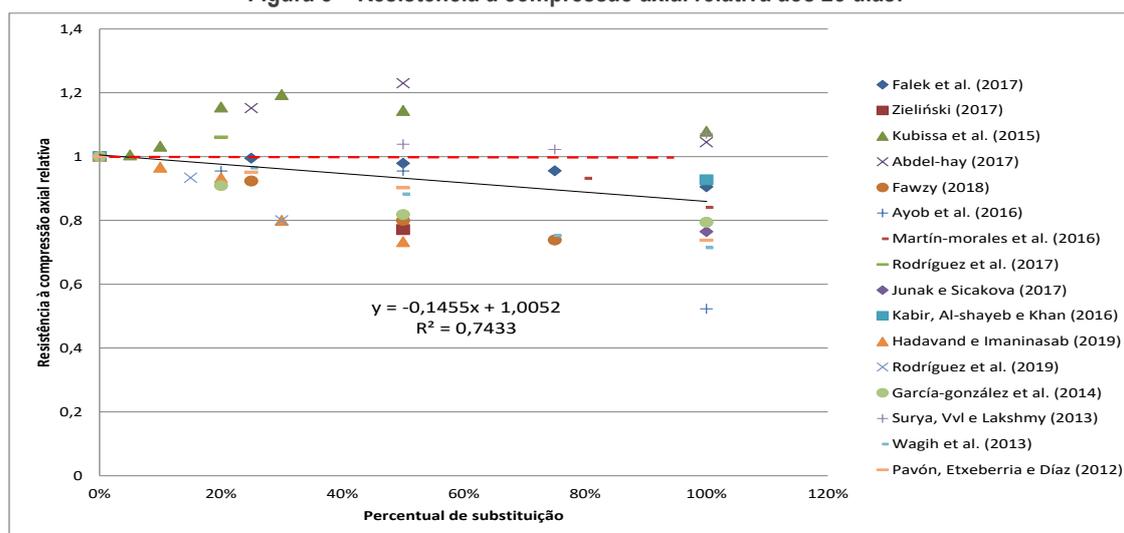
agregado, entre outros. Sendo assim, para análise dos resultados, este estudo só levou em consideração trabalhos que aplicaram diferentes teores de substituição do AGN pelo AGR.

Figura 7 – Resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias em função do teor de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado.



Ao avaliar os dados coletados, observa-se que, de forma geral, a resistência à compressão axial tende a decrescer conforme o aumento do teor de substituição do AGN pelo AGR. Este fato, pode ser melhor compreendido analisando a equação da reta mostrada na Figura 8, em que o coeficiente negativo corresponde a um comportamento decrescente para a linha de tendência. Ao mesmo tempo, o valor de  $R^2$  está próximo de 1, representando um bom parâmetro de análise.

Figura 8 – Resistência à compressão axial relativa aos 28 dias.



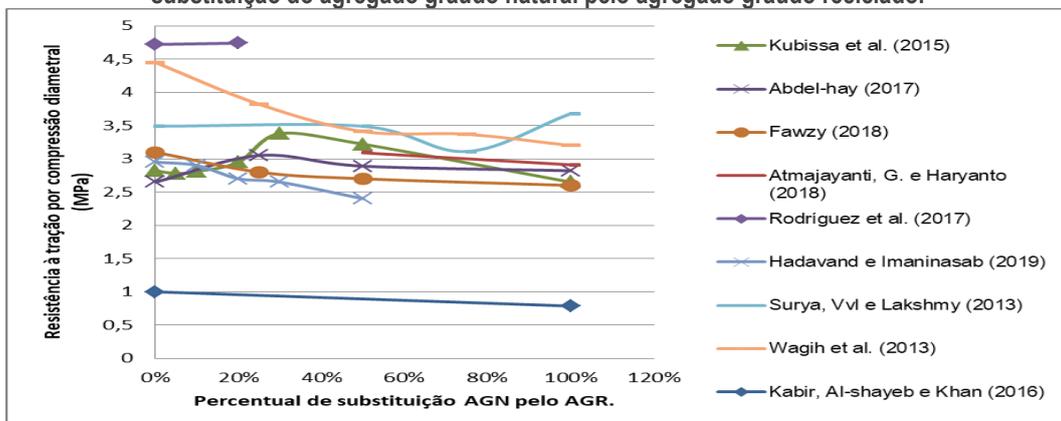
Nota: Para o gráfico de correlação dos dados foram considerados apenas 16 artigos, pois somente esses apresentaram em seus programas experimentais um parâmetro de referência, ou seja, concreto confeccionado apenas com AGN.



### 3.2.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

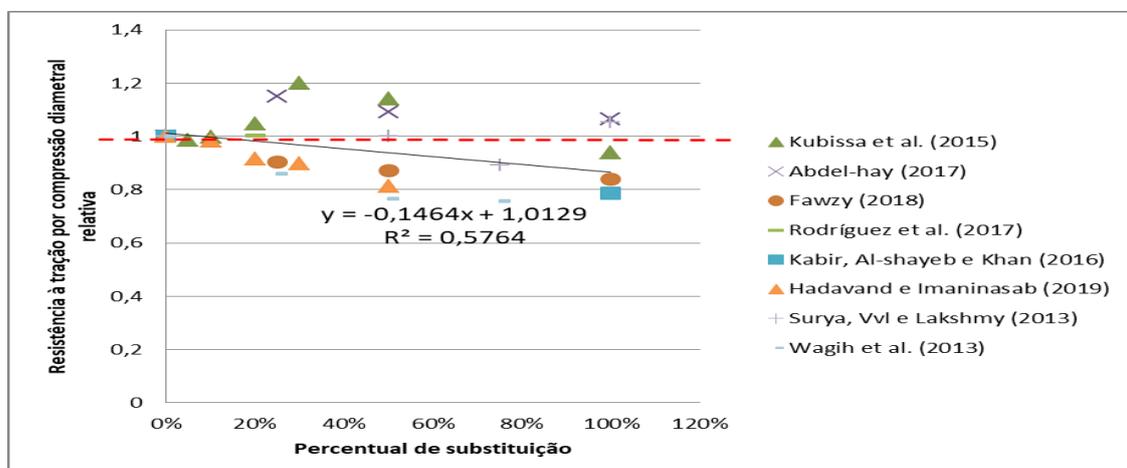
Dentre os 10 ensaios de resistência à tração por compressão diametral, 1 ensaio não pode ser comparado no gráfico (Figura 9), visto que os autores não utilizaram o agregado graúdo reciclado (AGR) como substituição do agregado graúdo natural (AGN), mas adição de sílica ativa em diversos teores no concreto com AGR. Para análise da resistência à tração por compressão diametral foram considerados trabalhos que aplicaram diferentes teores de substituição do AGN pelo AGR.

Figura 9 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias em função do teor de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado.



A análise dos dados coletados permite afirmar que, de forma geral, a resistência à tração por compressão diametral decresceu devido ao aumento do teor de substituição do AGN pelo AGR. A Figura 10 permite um melhor entendimento dos resultados, visto que a equação da reta apresenta um coeficiente negativo, mostrando um comportamento decrescente para a linha de tendência. Do mesmo modo, o valor de  $R^2$  é quase 60%, sendo possível realizar uma regressão linear com os pontos coletados, podendo observar o comportamento do ensaio.

Figura 10 - Resistência à tração por compressão diametral relativa aos 28 dias.





Nota: Para o gráfico de correlação dos dados foram considerados 8 artigos, pois somente esses apresentaram em seus programas experimentais um parâmetro de referência (0% de substituição), ou seja, concreto confeccionado apenas com AGN.

## 4. CONCLUSÕES

Conforme o portfólio bibliográfico e análises feitas acerca da utilização do agregado graúdo reciclado proveniente de resíduos de construção e demolição, mais especificamente de resíduos provenientes de concreto, é possível concluir que:

- A análise feita originou parâmetros confiáveis para concluir sobre o uso de agregado graúdo reciclado proveniente de resíduos da construção e demolição em relação à resistência à compressão axial e à resistência à tração por compressão diametral. Indicando que até um certo teor de substituição, ambas as resistências não são prejudicadas quanto ao desempenho do concreto com AGR.
- Através da análise realizada, observou-se que tiveram ensaios que constaram em no máximo cinco trabalhos, indicando assim lacunas no conhecimento referente ao tema abordado neste trabalho. Tais ensaios referem-se às propriedades da microestrutura e a parâmetros de durabilidade.
- Os ensaios menos frequentes apontam as lacunas consideradas através deste estudo, indicando vertentes de pesquisa para padronizar o uso do AGR no concreto. Além disso, percebeu-se que alguns trabalhos apresentaram tratamento prévio do AGR, visto que este agregado apresenta alto teor de absorção. Porém, não existe uma padronização do tratamento do AGR, o que indica vertentes para estudos que possam desenvolver um método prático e viável economicamente e ambientalmente para combater a alta absorção que este agregado apresenta.
- O preenchimento das lacunas encontradas por este estudo consentirá um importante desenvolvimento no conhecimento científico e tecnológico, no sentido de tornar habitual o uso de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição para uso estrutural ou não.



## 5. REFERÊNCIAS

1. ZHENG, Yi et al. Suspension stability of waterborne coating slurry prepared using construction and demolition waste. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 207, p.41-47, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.108>.
2. SAPUAY, S.e.. Construction Waste – Potentials and Constraints. **Procedia Environmental Sciences**, [s.l.], v. 35, p.714-722, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.074>.
3. FERREIRA, Ruan L.s. et al. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 208, p.601-612, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>.
4. MAGALHÃES, Ruane Fernandes de; DANIELVICZ, Ângela de Moura Ferreira; SAURIN, Tarcisio Abreu. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. **Waste Management**, [s.i.], v. 67, n. -, p.265-277, set. 2017.
5. ZHU, Pinghua et al. Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 210, p.442-450, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.203>.
6. WANG, Xinpeng et al. Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 221, p.805-816, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.201>.
7. GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. et al. Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 68, n. 330, p.151-179, 18 abr. 2018. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2018.13317>.
8. BERNARDI, Vinícius Freisleben. **A sustentabilidade com a recuperação e valorização de cacos e casqueiros provenientes de mármore e granito**. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
9. VILELA, Lílian de Oliveira. Aplicação do proknow-c para seleção de um portfólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial**, Paraná, v. 8, n. 1, p.76-92, 2012.
10. FALEK, K. et al. Influence of recycled aggregates on the mechanical and tribological behavior of concrete. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 139, p.456-461, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.237>.
11. ZIELIŃSKI, Krzysztof. Impact of Recycled Aggregates on Selected Physical and Mechanical Characteristics of Cement Concrete. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 172, p.1291-1296, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.157>.
12. KUBISSA, Wojciech et al. Properties of Concretes with Natural Aggregate Improved by RCA Addition. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 108, p.30-38, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.116>.
13. ABDEL-HAY, Ahmed Shaban. Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions. **Hbrc Journal**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.271-276, dez. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.07.001>.



14. DODDS, Wayne et al. Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 145, p.183-195, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.232>.
15. FAWZY, Yasser Abdelghany. Impact of recycled gravel obtained from low or medium concrete grade on concrete properties. **Hbrc Journal**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.1-8, abr. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.04.003>.
16. ÇAKİR, Özgür; SOFYANLI, Ömer Özkan. Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. **Hbrc Journal**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.157-166, ago. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.06.002>.
17. AYOB, Afizah et al. Engineering Behavior of Concrete with Recycled Aggregate. **Matec Web Of Conferences**, [s.l.], v. 87, p.1-6, 12 dez. 2016. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20178701002>.
18. ATMAJAYANTI, Anggun Tri; G., Chrisyanto Daniel Saragih; HARYANTO, Yanuar. The effect of recycled coarse aggregate (RCA) with surface treatment on concrete mechanical properties. **Matec Web Of Conferences**, [s.l.], v. 195, p.1-8, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201819501017>.
19. VENKRBEK, Václav; NOVÁKOVÁ, Iveta; HENKOVÁ, Svatava. Characteristics of Recycled Concrete Aggregates from Precast Slab Block Buildings. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 245, p.1-11, out. 2017. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/245/3/032076>.
20. BELAGRAA, Larbi; ABDELAZIZ, Meddah; MILOUD, Beddar. Study of the Physico-Mechanical Properties of a Recycled Concrete Incorporating Admixtures by the Means of NDT Methods. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 108, p.80-92, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.122>.
21. MARTÍN-MORALES, M. et al. Study of potential advantages of pre-soaking on the properties of pre-cast concrete made with recycled coarse aggregate. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 66, n. 321, p.1-13, 15 jan. 2016. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.01715>.
22. RODRÍGUEZ, Carlos et al. Properties of Concrete Paving Blocks and Hollow Tiles with Recycled Aggregate from Construction and Demolition Wastes. **Materials**, [s.l.], v. 10, n. 12, p.1-21, 30 nov. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma10121374>.
23. NOVÁKOVÁ, Iveta; MIKULICA, Karel. Properties of Concrete with Partial Replacement of Natural Aggregate by Recycled Concrete Aggregates from Precast Production. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 151, p.360-367, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.387>.
24. JUNAK, Jozef; SICAKOVA, Alena. Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate with Modified Surface. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 180, p.1284-1291, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.290>.
25. GALITSKOVA, Yulia M.; LIMARJEVA, Elizaveta V.. The Research of Qualitative Characteristics of Construction Materials based on Concrete Waste. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 111, p.228-232, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.081>.



26. KABIR, Shahid; AL-SHAYEB, Ammar; KHAN, Imran M.. Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 145, p.1518-1525, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.191>.
27. SHAHIDAN, Shahiron et al. Utilizing Construction and Demolition (C&D) Waste as Recycled Aggregates (RA) in Concrete. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 174, p.1028-1035, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.255>.
28. HADAVAND, Bahareh; IMANINASAB, Reza. Assessing the influence of construction and demolition waste materials on workability and mechanical properties of concrete using statistical analysis. **Innovative Infrastructure Solutions**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.1-11, 22 abr. 2019. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-019-0214-3>.
29. ULSEN, Carina et al. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. **Journal Of Materials Research And Technology**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.494-502, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.008>.
30. LEITE, Fabiana da Conceição et al. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 6, p.2972-2979, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>.
31. XUAN, D. X. et al. Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 45, n. 1-2, p.143-151, 15 jun. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9756-3>.
32. RODRÍGUEZ, Carlos et al. On the Possibility of Using Recycled Mixed Aggregates and GICC Thermal Plant Wastes in Non-Structural Concrete Elements. **Sustainability**, [s.l.], v. 11, n. 3, p.1-19, 25 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11030633>.
33. CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra et al. Performance estimation for concretes made with recycled aggregates of construction and demolition waste of some Brazilian cities. **Materials Research**, [s.l.], v. 15, n. 6, p.1037-1046, 25 set. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392012005000119>.
34. GARCÍA-GONZÁLEZ, Julia et al. Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture. **Materials**, [s.l.], v. 7, n. 9, p.6224-6236, 1 set. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma7096224>.
35. SURYA, M.; VVL, Kanta Rao; LAKSHMY, P.. Recycled Aggregate Concrete for Transportation Infrastructure. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, [s.l.], v. 104, p.1158-1167, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.212>.
36. WAGIH, Ashraf M. et al. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **Hbrc Journal**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.193-200, dez. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.08.007>.
37. PAVÓN, E.; ETXEBERRIA, M.; DÍAZ, N. E.. Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado en La Habana, Cuba. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 62, n. 307, p.431-441, 24 jan. 2012. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2012.63210>.



## **GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) NA CIDADE DE TUCURUÍ-PA, BRASIL.**

**Debora de S. Torquato<sup>(1)</sup>; Eduarda S. Fernandes<sup>(2)</sup>; Melina G. M. de Sousa<sup>(3)</sup>; Neyliane M. de O. Rocha<sup>(4)</sup>. Grazielle T. de Souza<sup>(5)</sup>**

(1) Universidade Federal do Pará/UFPA – deboratorquato@hotmail.com; (2) Universidade Federal do Pará/UFPA – eduardavargens41@gmail.com; (3) Universidade Federal do Pará/UFPA – melinatuc123@gmail.com; (4) Universidade Federal do Pará/UFPA – Anny.m.oliveira@gmail.com; (5) Universidade Federal do Pará/UFPA – grazielle\_tigre@hotmail.com

### **RESUMO**

A indústria da construção civil cresce mais a cada ano e, por consequência, a produção de resíduos que provêm dos canteiros de obras. Para que estes resíduos não sejam lançados em locais inapropriados, faz-se necessária uma gestão adequada dos mesmos, evitando assim grandes impactos ambientais. Com isso, o objetivo do presente artigo é apresentar um diagnóstico do atual cenário da gestão de RCC's em canteiros de obras na cidade de Tucuruí, no estado do Pará. Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas revisões bibliográficas e pesquisas de campo, as quais tornaram possível o uso de indicadores específicos para a gestão de resíduos no município. Os resultados da pesquisa foram analisados e em conjunto com um questionário aplicado foi possível ver que não há um plano de gerenciamento de RCC aplicado nessas obras, porém alguns resíduos são reaproveitados, como o de madeira, que é reaproveitado por terceiros, entretanto os trabalhadores não são instruídos a fazer o manejo correto desses materiais. Neste cenário, sugere-se que busquem medidas para qualificar a mão de obra local, conscientizar os trabalhadores dos impactos ambientais causado pelos RCC e também a elaboração de um plano municipal de gerenciamento dos resíduos da construção civil.

**Palavras-chave:** Canteiro de Obras, Gestão, Resíduos.

## **MANAGEMENT OF WASTE FROM CIVIL CONSTRUCTION (WCC) IN THE CITY OF TUCURUÍ-PA, BRAZIL.**

### **ABSTRACT**

The construction industry grows more each year and, consequently, the production of waste coming from construction sites. In order for these wastes not to be disposed of in inappropriate places, proper management of them is necessary, thus avoiding major environmental impacts. The objective of this article is to present a diagnosis of the current scenario of the management of WCC's in construction sites in the city of Tucuruí, in the state of Pará. For the development of this work, bibliographical reviews and field surveys were carried out. possible to use specific indicators for waste management in the municipality. The results of the research were analyzed and, together with an applied questionnaire, it was possible to see that there is no management plan for WCC applied in these works, but some waste is reused, such as wood, which is reused by third parties, are instructed to make the correct handling of these materials. In this scenario, it is suggested that they seek measures to qualify the local manpower, make workers aware of the environmental impacts caused by the WCC and also to prepare a municipal a plan management of waste from civil construction.

**Key-words:** Construction Site, Management, Waste.



## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Pinto (1999) <sup>(1)</sup>, no Brasil, a ausência de soluções adequadas de gerenciamento, quer para os efluentes líquidos ou resíduos sólidos, faz com que a geração dos mesmos atinja contornos gravíssimos.

A indústria da construção civil tem crescido a cada ano e, em decorrência disto, a produção de resíduos da construção civil (RCC), proveniente dos canteiros de obras. O descarte inadequado desses resíduos, de acordo com Alves (2017 apud BESEN et al., 2010) <sup>(2)</sup>, traz grandes perturbações ao meio ambiente, tornando-se necessário a atuação dos profissionais da área em busca de diretrizes para gestão desses resíduos.

Por gerar grandes impactos ambientais, não somente pela produção de resíduos, mas pela utilização de matéria-prima em grande quantidade, tem-se a necessidade de regulamentar essa atividade.

Em 31 de agosto de 1981, foi instituída a Lei 6.938, sobre o Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, que é constituído pelos órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Municípios e pelas Fundações instituídas pelo Poder Público, onde a mesma tem responsabilidade por proteger e melhorar a qualidade ambiental (BRASIL, 1981) <sup>(3)</sup>. Tendo como órgão consultivo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), onde no Brasil é o órgão responsável por regulamentar atividades que impacte o meio ambiente.

Por meio da Resolução n° 307/2002 <sup>(4)</sup>, a CONAMA definiu os resíduos da construção civil como materiais proveniente de construções, demolições, reparo e reforma de obras de construção civil, resultante da preparação e da terraplanagem, como: concreto em geral, blocos cerâmicos, tijolos, argamassa, tintas, madeiras, ente outros, que juntos constituem os entulhos de uma obra.

Ainda na resolução n° 307, Art. 3° <sup>(4)</sup>, a composição de resíduos sólidos da construção civil é classificada como descrito na Tabela 1.



Tabela 01 – Classificação dos resíduos da construção civil

CLASSE	DESCRIÇÃO DO RESÍDUO	EXEMPLOS
A	Materiais que podem ser reciclados ou reutilizados como agregado em obras de infraestrutura, edificações e canteiro de obras.	Tijolos, telhas e revestimentos cerâmicos; blocos e tubos de concreto e argamassa.
B	Materiais que podem ser reciclados e ganhar outras destinações.	Vidro, gesso, madeira, plástico, papelão e outros.
C	Itens para o qual não existe ou não é viável aplicação econômica para recuperação ou reciclagem.	Estopas, lixas, panos e pincéis desde que não tenham contato com substância que o classifique como D.
D	Aqueles compostos ou em contato de materiais/substâncias nocivos à saúde.	Solvente e tintas; telhas e materiais de amianto; entulho de reformas em clínicas e instalações industriais que possam estar contaminados.

Fonte: CONAMA, 2002

Geralmente, esses entulhos são contaminados, com solo ou materiais orgânicos, o que dificulta na separação dos RCCs para reciclagem, desta forma, em um canteiro de obras com descarte correto há uma maior qualidade nos resíduos que serão reutilizados.

Sendo assim, a reciclagem de materiais da construção civil, pode acarretar diversos benefícios, como:

- Sustentabilidade, que está ligado diretamente ao meio ambiente, pois evitando o descarte em aterros clandestinos, ameniza problemas como assoreamento de rios. Segundo (PINTO, 1999) <sup>(1)</sup>, os resíduos de construção e demolição, correspondem a cerca de 50% da massa sólida de resíduos urbanos, sendo assim, destacado a necessidade da reciclagem.

- Saúde, onde acúmulo de resíduos acarretam em aparecimentos de animais peçonhentos, que transmitem doenças. Além de reduzir a poluição, de acordo com John (1999 apud ÂNGULO *et al.*, 2001) <sup>(5)</sup>, utilizando escória de alto forno no lugar de cimento Portland, para a indústria de cimento, o índice de emissão de gás carbônico é reduzido.

- Economia, onde a utilização de matérias recicláveis na obra, pode gerar um ganho financeiro, reduzindo o consumo de recursos naturais não-renováveis, sendo substituídos por resíduos reciclados (JOHN, 2000) <sup>(6)</sup>.

Com isso, o objetivo do presente artigo é apresentar um diagnóstico do atual cenário da gestão de RCC's em canteiros de obras na cidade de Tucuruí, no estado do Pará.

## 2. METODOLOGIA



Visto que a geração de RCC's em canteiros de obra acontece por vários fatores como: falta de treinamento da mão de obra para fazer a triagem dos resíduos, a ausência de gestão de RCC no canteiro, e o desperdício de materiais em razão de processos pouco otimizados, o estudo realizado através deste trabalho está enquadrado no âmbito de pesquisas qualitativas, pois busca compreender o cenário da gestão de RCC no município de Tucuruí- PA.

Para o desenvolvimento da presente pesquisa baseou-se em revisões bibliográficas e pesquisa de campo. Na etapa de revisão bibliográfica foram levantados conhecimentos a respeito da atual situação dos RCC's nos canteiros de obras, os tipos de resíduos gerados, verificação das regulamentações existentes e as práticas de gestão desses resíduos.

Para a pesquisa de campo, utilizou-se como referência quatro canteiros de obras localizados na cidade de Tucuruí, município brasileiro localizado no sudeste do estado do Pará com pouco mais de 97 mil habitantes (IBGE, 2010) <sup>(7)</sup>. Prezando pelo sigilo dos responsáveis pelos canteiros de obra, cada um será denominado por números, obtendo assim o canteiro de obra "1", "2", "3" e "4".

Com o intuito de analisar a gestão de RCC desenvolvida em cada canteiro, foram desenvolvidas questões sobre o conhecimento e as práticas utilizadas na gestão dos resíduos gerado na obra, com base na resolução CONAMA (2002) <sup>(4)</sup>.

O questionário elaborado contou com 6 perguntas, onde o entrevistado poderia responder "SIM, NÃO ou ESPORADICAMENTE", e ainda, quando necessário, explicar os métodos de gerenciamento.

Foram levantadas as seguintes questões: se houve informação por parte dos órgãos fiscalizadores a respeito do plano de gerenciamento de resíduos da construção civil municipal; se haviam estratégias pontuais aplicadas dentro do canteiro para gestão desses resíduos; se havia a organização dos materiais e dos RCCs; se os funcionários tinham práticas conscientes de separação desses resíduos; se a separação de fato acontecia; e qual era a destinação dos resíduos.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise dos resultados obtidos através da pesquisa de campo, mostram a visão dos responsáveis pelas obras e seus colaboradores em relação a gestão do RCC em seus canteiros. Através das visitas *in loco* realizadas, constatou-se que os resíduos gerados nos canteiros de obra são compostos por solo, concreto, argamassas, alvenaria de tijolos, componentes cerâmicos, madeira, papel e plásticos, como mostra a Figura 01.



Figura 01 – Disposição dos RCC em cada canteiro de obra.



Fonte: Acervo pessoal.

Das quatro obras visitadas, apenas a obra 4 contava com a engenheira responsável presente, de modo que os encarregados forneceram todas as informações necessárias. Quando questionados se receberam algum tipo de informação a respeito da gestão de resíduos da construção civil por parte dos responsáveis pelas obras, todos responderam que não, e que em nenhum momento órgãos públicos fizeram visitas ou fiscalizações.

Em seguida, buscou-se informá-los que o gerenciamento dos RCC's visa minimizar os impactos ambientais causados pelo setor da construção, e foi questionado se havia estratégias pontuais aplicando-se na obra, qual a finalidade e quem a teria imposto. Apenas a obra 2, de reforma e ampliação, afirmou reutilizar resíduos de concreto, argamassas e tijolos, provenientes da demolição do local, para fazer o aterro das fundações. A obra 3, de construção residencial, afirmou que a única estratégia de reutilização é com relação à solos escavados e tijolos na construção do aterro. Ambas afirmaram doar restos de madeiras e fôrmas não necessárias para padarias locais. As demais obras, 1 e 4, afirmaram que não utilizam estratégias pontuais em seu canteiro.

Após isto, foi perguntado se há organização dos materiais na obra, uma vez que esta tem como objetivo otimizar a utilização dos mesmos, evitar o desperdício e os proteger contra intempéries. Sobre os agregados, as obras 2 e 3, devido serem restritas, afirmaram não ter estoque, sendo estes



fornecidos sempre que necessários na obra e armazenados ao ar livre, exceto pelos sacos de cimento, já as obras 1 e 4, continham estoque, por serem amplas, na Figura 02 pode ser visualizada a obra 1. Todos os canteiros também afirmaram que a organização e limpeza do local acontecia a cada final da semana, separando os papéis e plásticos dos entulhos e destinando-os à queima.

Figura 02 – Armazenamento de agregados da obra.



Fonte: Acervo pessoal.

As quarta e quinta questões realizadas buscaram conhecimento acerca de práticas de sensibilização e mobilização para com os encarregados em relação a separação correta dos resíduos da construção. Eles afirmaram que a separação ocorre, porém, não adequadamente. A principal separação é com relação às madeiras, que pode ser vista na Figura 03, seja para queimar ou doar, dos restos de concreto, tijolos e solos. Outros resíduos como, caixas, plásticos, sacos de cimento, entre outros, são separados e cada obra tem uma destinação. As obras 1 e 4 depositam em contêineres retirados pela prefeitura esporadicamente. A obra 2 dispõe de serviço de disk entulho, e afirmou não saber o destino final de tais resíduos. A obra 3 afirmou queimar estes resíduos em céu aberto.

Figura 03 – Separação da madeira para reutilizar



Fonte: Acervo pessoal.



## 4. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a realidade vivenciada em quatro canteiros de obras públicas e privada da cidade de Tucuruí, localizada no interior do estado do Pará. Com base na pesquisa realizada, pode-se constatar a necessidade de uma reavaliação dos métodos utilizados para gerenciamento desses resíduos e também é de suma importância a qualificação da mão de obra para ter um bom desempenho dos novos procedimentos empregados.

As normas existentes, são eficazes para as questões que envolvem sustentabilidade e meio ambiente, entretanto, falta uma maior discussão entre as partes interessadas que são, os órgãos públicos regulamentadores, a indústrias da construção civil e classe trabalhadora, afim de que o gerenciamento dos resíduos da construção civil seja eficaz em todas as suas etapas desde a separação até o descarte, pois apenas com o devido conhecimento da intensidade dos impactos, suas consequências e os benefícios do reaproveitamento dos resíduos na própria obra, haverá uma priorização na manutenção da natureza e seus recursos.

## 5. REFERÊNCIAS

1. PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em <<http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/GestResiduosSolidos.pdf>>. Acesso em: 10 de mai. 2019.
2. ALVES, G. M. L.. Resíduos sólidos da construção civil: educação e consciência ambiental na cidade de cajazeiras-pb. **Revista Educação Ambiental**, On-Line, ano XVI, ed. 60, 30 maio 2017. Disponível em: <<http://revistaea.org/artigo.php?idartigo=2745>>. Acesso em: 22 ago. 2019.
3. BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-6938-31-agosto-1981-366135-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 8 mai. 2019.
4. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**, de 05 de Julho de 2002. Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 8 mai. 2019.
5. ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M.; **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 2001. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - PCC - Departamento Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica. EPUSP. Disponível em <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ibracon/2000/CT206.pdf>>. Acesso em: 10 de mai. 2019.
6. JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica,



Universidade de São Paulo. Disponível em <[http://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/LV\\_Vanderley\\_John\\_-\\_Reciclagem\\_Residuos\\_Construcao\\_Civil.pdf](http://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/LV_Vanderley_John_-_Reciclagem_Residuos_Construcao_Civil.pdf)>. Acesso em: 10 de mai. 2019.

7. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tucuruui>>. Acesso em: 15 de mai. 2019.



# PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS RECICLADO DE CONCRETO POR DOIS PROCESSOS DE COMINUIÇÃO DISTINTOS

KARLISSON SILVA(1), IVA LIMA, ANDRESSA LIRA(2); PAULO GOMES(3)

(1) UFAL - Universidade Federal de Alagoas – karlison.andre@gmail.com; (2) UFAL - Universidade Federal de Alagoas – anobregalira@gmail.com; (3) UFAL - Universidade Federal de Alagoas – ivaemanuelyl@gmail.com; (4) UFAL - Universidade Federal de Alagoas - karlakamilap@gmail.com; (5) UFAL - Universidade Federal de Alagoas - paulocorreia.gomes@gmail.com

## RESUMO1

O reaproveitamento dos resíduos de concreto surge como uma alternativa para substituir os agregados naturais em parte ou em todo, por uma material reciclado que possui uma qualidade superior quando comparadas a outros tipos de resíduos. O entendimento das características físicas dos agregados gerados por diferentes processos de cominuição é um passo importante para a melhor aplicação do produto final. Para produção de agregados reciclados foram utilizados corpos de prova beneficiados em dois equipamentos diferentes (Britador de Mandíbulas e Moinho de Martelos). Foram analisadas as seguintes propriedades dos agregados: granulometria, forma do agregado, absorção de água, massa específica, teor de material fino. Com relação aos resultados foi possível identificar que a forma como os agregados são produzidos causam variação entre os resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Agregados, concreto, cominuição.

## PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF RECYCLED COARSE AND FINE AGGREGATES OF CONCRETE BY TWO DIFFERENT COMBINATION PROCESSES

### ABSTRACT

Reuse of concrete wastes as an alternative to replace the natural aggregates in part or in whole, by a recycled material that has a superior quality when compared to other types of waste. The understanding of the physical characteristics of the aggregates generated by different comminution processes is an important step towards the best application of the final product. For the production of recycled aggregates, specimens were used that were benefited in two different equipments (Jaw Crusher and Hammer Mill). The understanding of the physical characteristics of the aggregates generated by different comminution processes is an important step towards the best application of the final product. For the production of recycled aggregates, samples were used from two different equipments (Jaw Crusher and Hammer Mill). The following properties of the aggregates were analyzed: size analysis, aggregate shape, water absorption, density, fine material content. Regarding the results it was possible to identify that the way the aggregates are produced cause variation between the results obtained.

**Key-words:** Aggregates, concrete, comminution.



## 1. INTRODUÇÃO

No ramo da construção civil, o melhor desempenho do setor, nos últimos 24 anos, foi alcançado em 2010, quando registrou taxa de crescimento de 11,6%, de acordo com o DIEESE (2012)<sup>(1)</sup>. Deste modo, a constante preocupação com o meio ambiente e o aumento da escassez de recursos naturais tem proporcionado uma busca por métodos sustentáveis, com o intuito de reduzir o impacto causado pelo consumo desenfreado de recursos da natureza<sup>(2)(3)</sup>.

De acordo com a ABRELPE<sup>(4)</sup>, estima-se que em 2016, a geração de resíduos de construção e demolição (RCD) ultrapassou 70 milhões de toneladas por ano, ou seja, uma média de 300 kg/hab por ano. A destinação incorreta dos resíduos gerados, principalmente em aterros clandestinos ou sanitários, é responsável pela degradação do meio ambiente<sup>(5)(6)</sup>. Assim, o estudo para a transformação destes resíduos em matéria-prima destinada à produção de novos materiais é de grande importância para o processo de reutilização e reciclagem, evitando um maior número de lançamento na natureza<sup>(7)(8)</sup>.

Considerando-se que, no Brasil, não seja habitual a produção de concreto com material reciclado, percebe-se uma tendência generalizada, por parte da iniciativa privada e do poder público, em equacionar e administrar a geração de entulhos de construção civil, que se vem transformando em um problema de grandes proporções nas maiores metrópoles do país<sup>(9)</sup>. Em contra partida, a utilização de agregados reciclados na produção de concretos, em diversos estudos<sup>(10)(11)(12)(13)</sup>, é citada como uma alternativa para reduzir a quantidade de RCD dispostos nos aterros, além de ser uma proposta sustentável.

A composição dos resíduos pode variar de acordo com a sua origem e os mais comuns são aqueles provenientes de RCD, que são constituídos por fragmentos de argamassas, concretos, cerâmicas e outros materiais secundários. Entretanto, existe a possibilidade em que a predominância do material seja composta por mais de 90% de fragmentos de cimento Portland e Rochas<sup>(14)</sup>, o que torna este material apto, mediante um beneficiamento, para a produção de agregados de resíduos de concreto (ARC).

A etapa de cominuição constitui a operação de fragmentação que agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes interna, um sólido de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor<sup>(15)</sup>.



Segundo a UTS (1999 apud MOTTA, 2005)<sup>(16)</sup>, as maiores diferenças verificadas entre os agregados reciclados e naturais podem ser resumidas a: forma do grão e textura superficial, que no material reciclado tendem a ser mais irregulares; densidade, que normalmente é menor nos agregados reciclados por apresentarem alta porosidade; absorção de água, que se apresenta como a diferença mais marcante entre os dois materiais, quanto às propriedades físicas.

Sabendo que as características dos agregados reciclados apresentam diferenças devido à origem do resíduo e do processo de beneficiamento<sup>(17)(18)(19)</sup>, e em virtude da necessidade de atenção para uma construção sustentável, a partir da substituição do agregado natural para o reciclado <sup>(20)(21)</sup>, o presente estudo faz uma análise comparativa entre processos distintos de cominuição de agregados reciclados, a fim de verificar as suas respectivas características físicas (granulometria, índice de forma, massa específica e absorção).

## **2. METODOLOGIA**

O estudo experimental trata da produção de agregados graúdos e miúdos reciclados de concreto, utilizando dois equipamentos de cominuição diferentes (tritador de mandíbulas e moinho de martelos), onde esse estudo foi dividido em duas etapas:

- a) Amostragem e obtenção dos agregados reciclados: coleta das amostras de resíduos de concreto reciclados e beneficiamento dos agregados em dois diferentes processos;
- b) Caracterização do agregado reciclado: caracterização desses agregados quanto à granulometria, forma do agregado, absorção de água e massa específica.

### **2.1. Amostragem e obtenção dos agregados reciclados**

O processo de beneficiamento do ARC envolve uma série de atividades. Primeiramente, foi realizada a coleta do resíduo, onde foram utilizados um total de 100 (cem) corpos de prova (CP) de concreto, com dimensões 10x20 cm, estes, foram provenientes do controle de qualidade de construtoras e de pesquisas da própria universidade, disponibilizado pelo LEMA. Os CP foram rompidos para obter a resistência à compressão e diminuir o tamanho do resíduo, uma vez que existe uma limitação de abertura na entrada dos equipamentos (britador de mandíbulas – Rota 1 e moinho de martelos – Rota 2). Após o rompimento na prensa, os resíduos foram fragmentados de forma manual com o auxílio de uma marreta. O material triturado passou por um processo de homogeneização com o intuito de diminuir a variabilidade do material.



As técnicas desenvolvidas para homogeneização utilizada em agregados reciclados buscam a obtenção de propriedades físicas nos padrões técnicos adequados ao uso futuro como material substituto dos agregados naturais. Assim, foram segregadas duas amostras de aproximadamente 185kg cada por meio de quarteamento para posterior comparação entre dois diferentes processos de cominuição: Rota 1 e Rota 2.

O britador de mandíbulas fragmenta o material através da força de compressão (esmagamento) aplicada por uma ou duas superfícies (mandíbulas) <sup>(15)</sup>. Para o processo de cominuição do resíduo, o equipamento foi regulado para obter agregados com dimensões máximas de 25mm. A amostra que foi destinada a ser cominuído neste equipamento precisou passar três vezes pelo equipamento, até restar muito pouco ou quase nada de material retido na peneira de 25 mm.

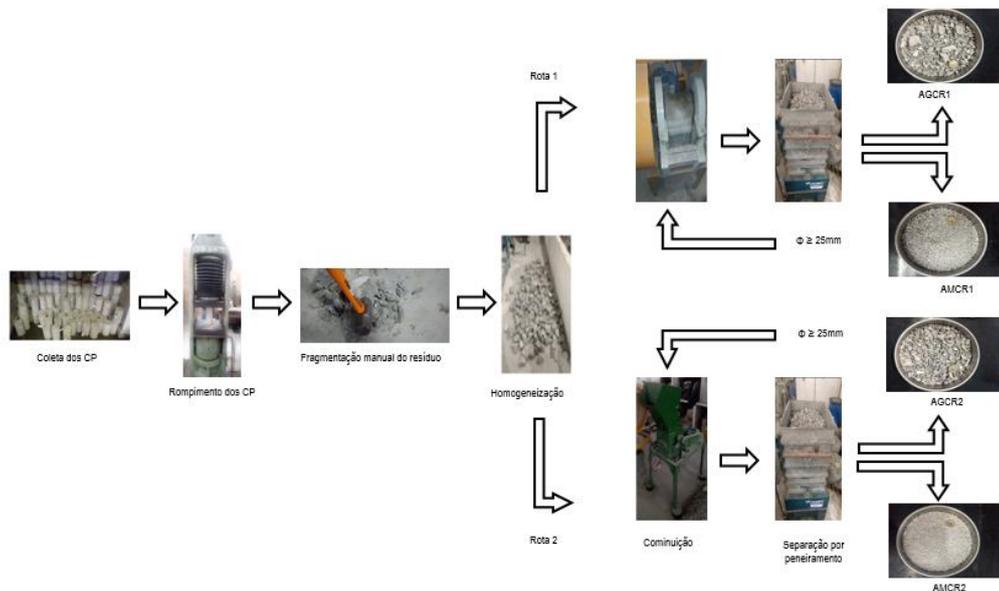
No moinho de martelos, o material sofre impacto proveniente dos martelos maciços fixos ao rotor e com a superfície interna da câmara <sup>(15)</sup>. Dessa forma, o agregado é reduzido devido ao atrito e ao cisalhamento, até que seja capaz de passar pela grade fixa com abertura máxima de 21 mm. A amostra fragmentada neste equipamento produziu agregados graúdos com dimensões menores que 25 mm, tendo todo o material passado pela peneira de 25 mm com apenas uma passagem no triturador.

Uma vez obtido os agregados reciclados de concretos eles foram separados em graúdos e miúdos ficando assim definidos: Agregado Graúdo de Concreto Reciclado Rota 1 (AGCR1); Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Rota 1 (AMCR1); Agregado Graúdo de Concreto Reciclado Rota 2 (AGCR2) e o Agregado Miúdo de Concreto Reciclado Rota 2 (AMCR2).

Um resumo dos procedimentos realizados pode ser observado no fluxograma de amostragem e obtenção dos agregados reciclados de concreto disposto na Figura 1.



**Figura 1 - Fluxograma de amostragem e obtenção dos agregados reciclados de concreto.**



## 2.2. Caracterização do agregado reciclado

Nesta seção, estão descritas as propriedades analisadas no presente trabalho: distribuição granulométrica, índice de forma, massa específica e absorção de água. As normas utilizadas para verificação das características supracitadas estão dispostas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Normas para verificação das propriedades dos agregados reciclados.**

Propriedades	Normas
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 <sup>(22)</sup>
Forma do agregado	NBR 7809 <sup>(23)</sup> ; NBR 5564 <sup>(24)</sup>
Massa específica	NBR NM 52 <sup>(25)</sup> ; NBR NM 53 <sup>(26)</sup>
Absorção de água	NBR NM 30 <sup>(27)</sup> ; NBR NM 53 <sup>(26)</sup>
Material Fino	NBR NM 46 <sup>(28)</sup>

### 2.2.1. Forma do agregado

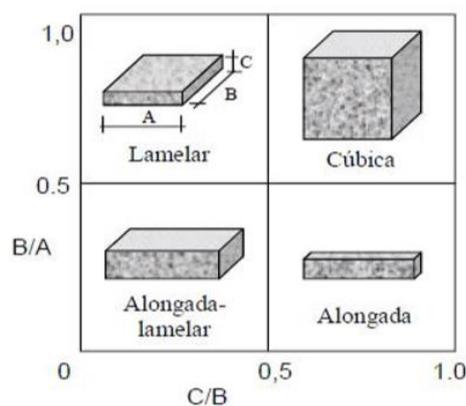
Para avaliar a forma dos grãos, duas técnicas foram utilizadas. A primeira foi a do índice de forma<sup>(23)</sup>, que representa a média da relação entre o comprimento e a espessura (comprimento/espessura) de 200 grãos dos agregados, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe utilizando o paquímetro, sendo estas frações maiores ou iguais da granulometria de 9,5mm. O resultado da média obtida é um valor entre 1 e 3, que de



forma geral da entender que quanto mais próximo do valor 1 mais cubico será o agregado e quanto mais próximo de 3 mais alongado, este último valor é determinado pela NBR 7211<sup>(29)</sup>.

A segunda técnica<sup>(24)</sup> utilizada determina a forma dos grãos por paquímetro e classifica-a em lamelar, cúbica, alongada-lamelar e alongada (Figura 3), em função da razão entre a espessura e a largura (C/B) e da razão entre a largura e o comprimento (B/A), estando a razão entre as relações (C/B) e (B/A) entre intervalos de 0 a 1. Para este ensaio a norma citada anteriormente utiliza agregados com dimensões maiores ou iguais a 19mm e uma quantidade de 100 grãos para medição.

Figura 3 - Representação dos parâmetros de forma estabelecidos pela NBR 5564 (ABNT, 2011).



Fonte: Farias e Palmeiras (2010)<sup>(30)</sup>.

Para realizar este ensaio foram utilizados 200 grãos selecionados para a norma de Índice de forma<sup>(23)</sup>, sabendo que a norma NBR 5564<sup>(24)</sup> exige apenas 100 fragmentos. Com relação ao tamanho das partículas foram medidas partículas a partir de 9,5mm, entretanto, a segunda técnica utilizada<sup>(24)</sup> prevê a dimensão inicial de 19mm.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

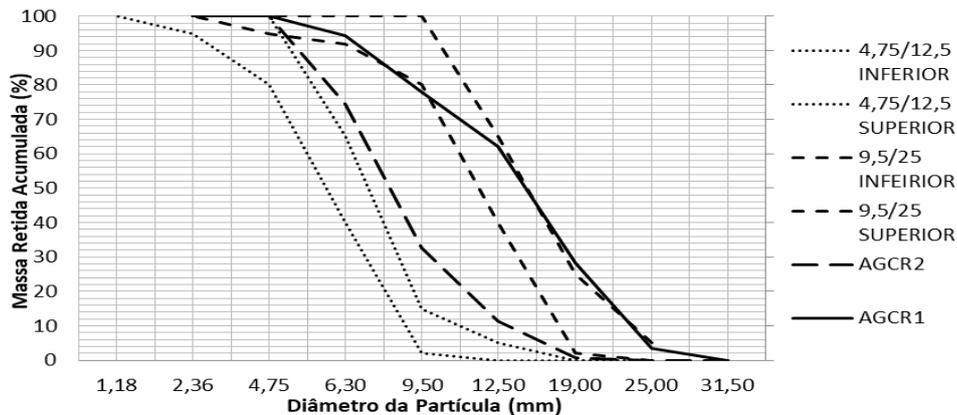
A seguir são apresentados e analisados os resultados referentes as características físicas dos agregados obtidos nas duas diferentes rotas (britador de mandíbulas – rota 1 e moinho de martelos – rota 2).

#### 3.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo está representada nas figura 5.

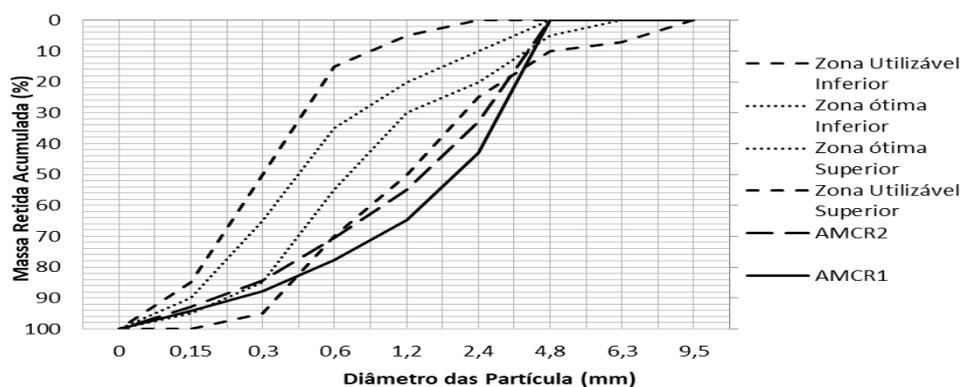


Figura 5 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos reciclados de acordo com NBR NM 248<sup>(22)</sup>.



Na Figura 3 estão comparadas as curvas granulométricas dos agregados reciclados graúdos com os limites das zonas granulométricas estabelecidas<sup>(22)</sup>. Os AGCR1 apresentaram próximos de se enquadrarem entre as zonas 9,5/12,5 inferior e 9,5/12,5 superior. Já os AGCR2 não se enquadraram a nenhuma das curvas granulométricas ficando entre as faixas 4,75/9,5 superior e 9,5/25 inferior. Os AGCR1 apresentaram granulometria mais grossa que os AGCR2. As dimensões máximas características foram diferentes para os dois tipos de agregados, o AGCR1 ficou com 25 mm e o AGCR2 apresentou 19mm. Já o módulo de finura apresentou valores muito próximos para os dois processos ficando AGCR1 6,90 e o AGCR2 com 6,33.

Figura 6 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos reciclados de acordo com a NBR NM 248<sup>(22)</sup>.



A partir da Figura 6, observa-se que os agregados miúdos apresentam uma distribuição contínua, porém, não se enquadram em nenhum limite das zonas granulométricas estabelecidas pela NBR NM 248<sup>(22)</sup> ficando acima da zona utilizável superior. Os AMCR1 tiveram granulometria mais grossa que os AMCR2. Com relação a dimensão característica máxima o valor foi igual para os dois agregados 4,75mm. O módulo de finura apresentou para o AMCR1 3,67 e para o AMCR2 3,36.



### 3.2 Forma do agregado

Analisando os dados da tabela 2, percebe-se que, para todas as faixas granulométricas, o índice de forma resultou em valores menores que 3, mostrando que todos os resultados obtidos estão dentro do limite recomendado<sup>(29)</sup>, que determina que o índice de forma não deve ser superior a 3. A granulometria do AGCR1 de 9,5 mm foi a que mais se aproximou do valor máximo 3. Da mesma forma, que a média total indica que AGCR1 e AGCR2 estão mais próximos do formato lamelar. Analisando os dados de forma<sup>(24)</sup> os AGCR1 enquadraram-se com formato cúbico, já os ACR2 também tenderam ao formato cúbico, porém, ultrapassou os limites máximos determinados.

**Tabela 2 - Determinação dos parâmetros de forma pela NBR 7809 <sup>(23)</sup> e pela NBR 5564<sup>(24)</sup>.**

		AGCR1				AGCR2		
		9,5	12,5	19,5	Média Total	9,5	12,5	Média total
Índice de forma	Média	2,8	2,5	2,5	2,6	2,2	2,3	2,5
	Desvio Padrão	1,2	0,7	0,8	0,9	0,9	0,7	0,9
Espessura/ Largura	Média	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Desvio Padrão	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Largura/ Comprimento	Média	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7
	Desvio Padrão	0,5	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2

### 3.3 Massa específica

Os resultados das massas específicas para os agregados reciclados graúdos encontra-se na tabela 3.

**Tabela 3 - Valores médios da massa específica dos agregados graúdo (g/cm<sup>3</sup>).**

Agregado Graúdo	AGCR1	AGCR2
Massa específica do agregado seco	2,60	2,64

De acordo com os dados fornecidos pela tabela 3, observa-se que os valores médios encontrados para ambos os agregados graúdos foram bem próximos. Estudos mostram<sup>(30)</sup> que os valores de massa específica variam entre 2,12 e 2,70 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados de massa específica encontrados na bibliografia<sup>(11)</sup> são muito variáveis, mesmo para materiais reciclados com composição muito



parecida. Ainda, a autora complementa que o fato pode ser explicado com base na própria composição do material, tipo de beneficiamento, granulometria e outros. A próxima tabela 4 mostra o resultado para a massa específica dos agregados miúdos.

**Tabela 4 - Valores médios da massa específica dos agregados miúdo (g/cm<sup>3</sup>).**

Agregado Miúdo	AMCR1	AMCR2
Massa específica	2,26	2,30

Com os dados fornecidos pela tabela acima é possível perceber que os agregados miúdos tiveram uma variação igual ao dos grãos, onde AMCR2 foi um pouco maior que AMCR1 e para ambos os agregados miúdos os valores ficaram entre os valores estabelecidos<sup>(31)</sup>.

### 3.4 Absorção de água

A absorção de água dos agregados reciclados está representada na tabela 5.

**Tabela 5 - Valores médios de absorção dos agregados grãos e miúdo.**

AGREGADO	%
AGCR1	6,00
AGCR2	6,40
AMCR1	6,20
AMCR2	6,89

A absorção encontrada nos agregados reciclados tabela 5, enquadra-se nos valores preconizados pela norma<sup>(32)</sup>, para os agregados grãos o valor máximo da absorção é menor ou igual a 7%, o ACCR2 foi o que mais se aproximou do valor limite. Já para os agregados miúdos o valor máximo de absorção é menor ou 12%, o AMCR2 atingiu um valor pouco maior que a metade permitida.

### 3.5 Teor de material fino

A tabela 6 apresenta o teor de material fino que passa pela peneira de 75µm, dos agregados miúdos reciclados.

**Tabela 6 - Valores médios do teor de material fino (%).**

AGREGADO	%
AMCR1	2,87
AMCR2	3,06

O resultado do teor de material fino dos agregados miúdos estão dentro do limites permitidos pela NBR 7211<sup>(29)</sup>, estabelecendo o uso dos AMCR1 para concretos submetidos a desgaste superficial e para AMCR2 para uso em concretos protegidos do desgaste superficial. Para os dois tipos de



agregados miúdos os valores estão abaixo dos 15% estabelecidos pela NBR 15116<sup>(31)</sup> para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.



## 4. Conclusão

- De acordo com os resultados obtidos, percebeu-se que, por meio dos dois processos de cominuição (Rota 1 e Rota2), as curvas granulométricas dos agregado graúdos e miúdos não se encaixaram em nenhuma das zonas estabelecidas pela norma utilizada. Além disso, o módulo de finura obtido pelo processo de compressão foram maiores que os de impacto o que gerou agregados mais grossos.
- Ao que refere-se a forma do agregado, a verificação utilizando a primeira metodologia com duas dimensões apresentou valores para ambos os agregados graúdos mais próximos do valor 3, isto implica em um formato lamelar. A inclusão de mais uma dimensão utilizando a segunda metodologia levou a valores que deram a forma cúbica para os dois tipos de agregados.
- Em relação à massa específica, percebeu-se que os valores encontrados pelos dois processos de cominuição foram muito semelhantes entre si tanto para os agregados graúdos quanto para os miúdos, entretanto apesar da pouca diferença é possível observar que os agregados gerados pelo processo de impacto gerou um material com maior massa específica do agregado seco e massa específica, uma possível causa foi a forma como o material é cominuído, os impactos causados pela rotação dos martelos e os choques com o aparato do equipamento podem ter contribuído para diminuir a argamassa aderida as britas.
- Ao que refere-se à absorção, os valores encontrados pela rota 2 também foram maiores, apesar da variação se apresentar com uma pequena discrepância, mostrando que o moinho de martelos apresentou maior absorção. Dessa forma, analisando estas duas características, a escolha pelo procedimento pelo moinho de martelos ou britador de mandíbulas não apresenta modificações significantes.
- Em relação a absorção, os agregados produzidos através do processo de impacto, tanto o graúdo quanto o miúdo, tiveram valores um pouco maiores que os agregados produzidos pelo processo de compressão, essa diferença pode ser explicada pela forma como as partículas são fragmentas no segundo processo gerando finos que se aderem aos grãos maiores.



- O teor de material fino foi praticamente o mesmo para os dois agregados miúdos, com um pequeno acréscimo para os AMRC2, uma possível causa para esta variação pode ser o menor tamanho das partículas geradas pelo processo de cominuição por impacto que gera uma quantidade de materiais finos que aderem aos agregados.



## 5 REFERÊNCIAS

1. Departamento intersindical de estatística e estudo socioeconômicos. Estudo Setorial da Construção. São Paulo: DIEESE, 2012. Disponível em: <<https://www.dieese.org.br/estudosetorial/2012/estPesq65setorialConstrucaoCivil2012.html>>. Acesso em: 18 de Dezembro de 2018.
2. PORTELA, I. F., TROMBIM, D. C., & GONÇALVES, E. P. **Concreto reciclado: estudo e caracterização das matérias primas**. Revista Univap, 22(40), 634. 2017.
3. Santos, A. G., Teixeira, R. W., de Mello, E. A., & Teixeira, J. **Avaliação do custo de construção de uma estrutura de pavimento empregando agregado reciclado de RCD**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 2015.
4. ABRELPE, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017.
5. PASCHOALIN, Filho, João Alexandre; Graudenz, Gustavo Silveira. **Destinação irregular de resíduos de construção e demolição (RCD) e seus impactos na saúde coletiva**. Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 6, n. 1, 2012.
6. FAGURY, S.C; GRANDE, F.M. **Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)- aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP**. Exacta, v. 5, n. 1, 2007.
7. JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. **Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos**, 2000.
8. ANGULO, S. C., **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos**, Tese D. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
9. LEVY, S. **Produzindo concretos ecológica e politicamente corretos**. *Exacta*, 4 (2), 375-384. 2006.
10. BAZUCO, R. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 1999.
11. LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2001.
12. ANGULO, S. C., **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de Suas Características no Comportamento Mecânico de Concretos**, Tese D. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.



13. ZORDAN, S., PAULON, V. A., **A Utilização do Entulho como Agregado para o Concreto**, *Engenharia e Construção*, v. maio, n. 44 e 45, pp. 19-21, 2000.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos
15. Angulo, S. C., & FIGUEIREDO, A. D. (2011). **Concreto com agregados reciclados**. ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa.
16. FIGUEIRA; H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M; LUZ, A. B. C. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de minérios**. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.
17. MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. (2005).
18. BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2003.
19. Moreira, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2010.
20. TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Universidade Federal de Alagoas: Maceió, 2007.
21. Lovato, P. S. (2007). **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS 2007.
22. Vieira, G. L., Dal Molin, D. C., & Lima, F. B. (2004). **Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição**. *Revista Engenharia Civil*, 5-18.
23. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
24. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.
25. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 5564**: Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.



26. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
27. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
28. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
29. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
30. \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2009.
31. FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. **Agregados Para a Construção Civil.** In: ISAIA, G. C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.* São Paulo: Ibracon, 2010.
32. CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.
33. \_\_\_\_\_. **ABNT 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro 2004.



# PRODUÇÃO DE CLÍNQUER PORTLAND COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO *PELLET* NA FORMAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS

F. N. COSTA<sup>1</sup>; C. M. R. DIAS<sup>2</sup>; D. V. RIBEIRO<sup>3</sup>

(1) PPEC – Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil da Universidade Federal da Bahia - fernandacosta@ufrb.edu.br; (2) Universidade Federal da Bahia – clebermrd@gmail.com; (3) Universidade Federal da Bahia – verasribeiro@hotmail.com

## RESUMO

Nos últimos anos intensificaram-se os esforços para a redução das emissões de gases do efeito estufa no contexto do desenvolvimento sustentável, com pesquisas na produção de novos materiais e ligantes para a construção. Esse artigo analisou a influência da geometria dos *pellets* na produção dos clínqueres com a incorporação de resíduo de construção civil (RCC). Foram adotados procedimentos adaptados da metodologia proposta pela ABCP e adotada em estudos de clínqueres laboratoriais, na tentativa de simular etapas do processo industrial. *Pellets* foram preparados com a mesma formulação, porém com três diferentes geometrias: esférico com diâmetro de 1 cm e 2 cm, com moldagem manual, e semi-esférico com diâmetro de 2 cm empregando-se moldes de PLA (ácido polilático) impressos em impressora 3D. Os clínqueres foram caracterizados utilizando-se a técnica de difração de raios X (DRX) e o método de Rietveld foi empregado na quantificação das fases. Observaram-se variações nas quantidades das fases alita e belita com a geometria, embora utilizadas as mesmas condições de calcinação, provavelmente devido à variação da área superficial, o que possibilitou diferenças na área de exposição e provocou gradientes da taxa de resfriamento. Verificou-se que o uso de molde padroniza e facilita a moldagem dos clínqueres.

**Palavras-chave:** RCC, *pellets* esféricos, *pellets* semi-esféricos, molde impresso em 3D, procedimento de produção.

## Portland clinker production with residue of civil construction: influence of pellet geometry in the formation of mineralogic phases

### ABSTRACT

In recent years efforts have been intensified to reduce greenhouse gas emissions in the context of sustainable development, with research into the production of new materials and building binders. This paper analyzed the influence of pellet geometry on the production of clinkers with the incorporation of construction waste (RCC). Procedures were adopted adapted from the methodology proposed by the ABCP and adopted in laboratory clinker studies, in an attempt to simulate stages of the industrial process. Pellets were prepared with the same formulation, but with three different geometries: spherical with a diameter of 1 cm and 2 cm, with manual molding, and a semi-sphere with a diameter of 2 cm, using PLA (polylactic acid) molds printed on a printer 3D. The clinkers were characterized using the X-ray diffraction (XRD) technique and the Rietveld method was used in the quantification of the phases. Variations in the hatrurite and larnite phases were observed with the geometry, although the same calcination conditions were used, probably due to the variation of the surface area, which allowed differences in the area of exposure and caused gradients of the cooling rate. It has been verified that the use of mold standardizes and facilitates the molding of clinkers

**Key-words:** RCC, spherical pellets, semi-spherical pellets, 3D printed mold, production procedure.



## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, intensificaram-se os esforços para reduzir emissões de gases do efeito estufa <sup>(1)</sup> e minimizar a exploração de recursos naturais no contexto do desenvolvimento sustentável, com pesquisas na produção de novos materiais e ligantes para a construção. A reutilização de resíduos sólidos urbanos (RSU) e subprodutos industriais tem se mostrado como uma alternativa muito atrativa, devido aos benefícios ambientais da reutilização, em resposta à prática de disposição inadequada desses rejeitos. No Brasil, em 2017, cerca de 42,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, 59,1% do total coletado, foram dispostos em aterros sanitários <sup>(2)</sup>. O restante, 40,9%, foi despejado em locais inadequados, como lixões ou aterros controlados, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde <sup>(2)</sup>.

Os resíduos de construção civil (RCC), que representam cerca de 60% dos RSU <sup>(2)</sup>, oferecem muitas oportunidades para sua reutilização em substituição aos agregados naturais <sup>(3-6)</sup>. Numa outra perspectiva, esses resíduos têm sido testados na fabricação de cimentos, substituindo parte da matéria-prima convencional (calcário e argila) do clínquer Portland <sup>(7-10)</sup> ou sendo utilizados como adição substituindo parte do clínquer na composição final do cimento <sup>(11)</sup>.

O desenvolvimento dos estudos em clínqueres envolve um método experimental que já foi adotado em diversos trabalhos, na tentativa de simular o processamento industrial <sup>(12-15)</sup>. Entre esses procedimentos, está a configuração da geometria dos *pellets* para produzir os clínqueres: i) *pellets* esféricos moldados manualmente com diâmetro aproximado de 2 cm <sup>(15)</sup>; ii) *pellet* conformado em molde semi-elipsoidal com 1,2 gramas em média <sup>(16)</sup>; iii) *pellets* com dimensões 50 × 50 × 15 mm conformados usando uma prensa hidráulica de 10 toneladas <sup>(17)</sup>.

A ausência de estudos evidenciando que as características geométricas do *pellet* exercem influência na formação das fases cristalinas do clínquer, uma vez que a variação da área superficial, isto é, a área de exposição, influencia na calcinação e no posterior gradiente de resfriamento, foi o motivador para essa pesquisa.

Neste sentido, esse artigo analisou a influência da geometria dos *pellets* na produção dos clínqueres Portland com incorporação de RCC, na formação de fases cristalinas.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Foram utilizadas amostras de calcário e argila, disponibilizadas por uma cimenteira localizada no Estado de Sergipe, e amostras de RCC classe A <sup>(18)</sup> provenientes da Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A. (UVRG), localizada na Região Metropolitana de São Paulo.

Ao receber o material das obras, é realizada uma pré-triagem na UVRG, com a finalidade de remover materiais indesejados, como metais, gesso, papel e outros materiais de dimensões próximas ou superiores ao limite de alimentação da moega. Nesta etapa, são removidos, predominantemente, madeiras e materiais de grandes dimensões, sendo posteriormente acondicionados em caçambas Roll-on/Roll-off. Após a pré-triagem, o material é vertido em uma tremonha primária.

O início do processo de produção do RCC se dá em uma peneira vibratória, em que, por diferença granulométrica, o resíduo é separado em duas correntes, sendo uma com tamanho maior que 10 mm e outra menor que 10 mm, denominada escalpe, contendo predominantemente solo em sua composição. Os materiais com tamanho maior que 10 mm são depositados diretamente no triturador primário para seu processamento. Nesse momento, é gerado um material pulverulento, conhecido como fino de resíduo de construção civil (FRCC), que é separado do restante do material por meio de um ciclone, levando-o até baias específicas de armazenamento.

O material restante passa por um novo peneiramento, com o objetivo de obter o RCC com dimensões menores que 40 mm. O material que ficar retido neste processo de peneiramento passa por um novo processo de britagem e peneiramento. Por fim, o material com dimensões inferiores a 40 mm, ao cair na terceira peneira, é separado em três frações de dimensões entre 0 e 10 mm, 10 e 20 mm e 20 e 40 mm <sup>(5)</sup>.

Nessa pesquisa foram utilizadas as frações finas do resíduo de construção civil (FRCC) da UVRG provenientes da moagem de grãos do RCC passantes nas peneiras com abertura de 40 mm e retidos na peneira com 20 mm de abertura.



## 2.2 Métodos

Foram recebidos quatro lotes diferentes do RCC que, após homogeneizados, tiveram amostras representativas selecionadas por meio de quarteamento, até obtenção da quantidade necessária para os estudos. As partículas foram cominuídas utilizando um moinho de mandíbulas e, posteriormente, um moinho horizontal de bolas cerâmicas, até que fosse atingida a granulometria desejada. A última etapa do beneficiamento do RCC consistiu no peneiramento dos materiais em peneira de abertura de malha igual a 75  $\mu\text{m}$ . As amostras de calcário e argila, também, foram moídas até ficarem com partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$ .

Os principais procedimentos adotados para produção dos clínqueres seguiram pesquisas anteriores (12-15), de acordo com metodologia proposta pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), para confecção e calcinação dos clínqueres laboratoriais, na tentativa de simular as etapas do processo de produção industrial, que envolve: moagem e homogeneização das matérias-primas, pré-calcinação da farinha, calcinação do clínquer e resfriamento brusco.

Inicialmente, foi realizada a caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas e, a partir destes resultados, foram realizadas as dosagens das farinhas de clínquer, buscando incorporar o RCC, substituindo toda a argila e parte do calcário. Para ser utilizado como referência, foi dosado um clínquer com as matérias-primas tradicionais, sem incorporação do RCC.

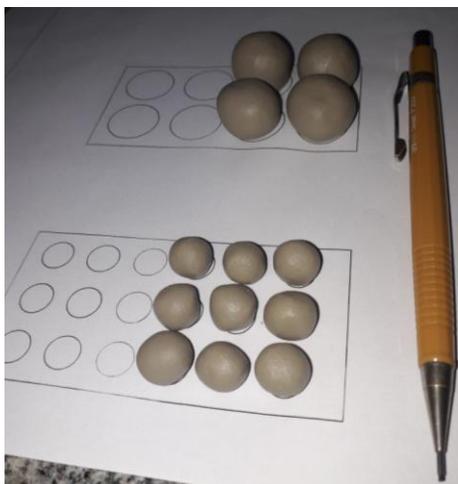
A dosagem das farinhas foi feita considerando os módulos químicos Fator de Saturação de Cal-FSC, Módulo de Alumina-MA e Módulo de Sílica-MS (19), sendo adotado o valor de FSC 98, conforme pesquisas recentes sobre o tema (17, 20, 21), buscando-se a obtenção de clínqueres com maior teor de alita e menores teores de cal livre.

Foram moldadas amostras em formato esférico (*pellets*), em três diferentes configurações, porém com a mesma dosagem das matérias-primas e com adição de 20% (em massa) de água, a fim de facilitar a moldagem destas esferas: a) *Pellet* esférico com 1 cm de diâmetro; b) *Pellet* esférico com 2 cm de diâmetro; c) *Pellet* semi-esférico com 2 cm de diâmetro.

Os *pellets* com diâmetro de 1 cm e de 2 cm foram moldados manualmente, utilizando como apoio um gabarito com as dimensões impressas numa folha de papel, conforme ilustrado na Figura 1. Para a moldagem dos *pellets* em semi-esfera de 2 cm de diâmetro foram utilizados moldes em filamento de PLA (ácido polilático) fabricados em impressora 3D, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 1 – *Pellets* moldados manualmente.



Fonte: Autores

Figura 2 - *Pellets* em molde de poliácido láctico.



Fonte: Autores

Os *pellets* foram secos em estufa a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  e colocados em cadinhos de alumina, sendo levados para calcinação à  $1450^\circ\text{C}$  num forno laboratorial modelo LHT 02/17 LB, da marca Nabertherm (Figura 3). Devido à presença de uma mesa de elevação motorizada, os clínqueres são expostos automaticamente ao resfriamento brusco, forçado, conforme ilustrado na Figura 4. Essa etapa é essencial para manter as fases mineralógicas e garantir as propriedades desejadas no clínquer experimental (22).

Figura 3 - Forno laboratorial utilizado, com temperatura máxima do equipamento de  $1650^\circ\text{C}$ .



Fonte: Nabertherm (2019)

Figura 4 – Mesa de elevação com descida de clínqueres para resfriamento rápido.

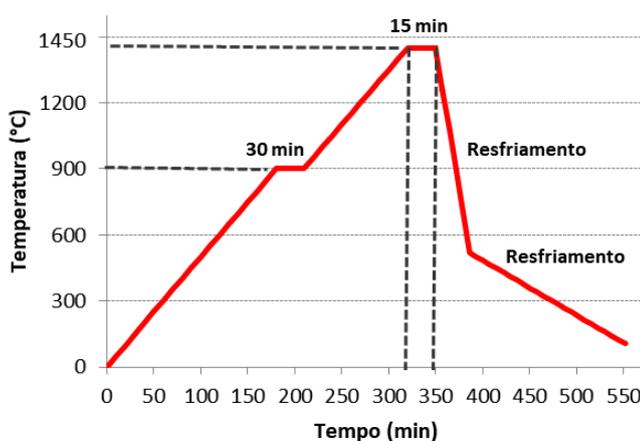


Fonte: Autores



A rotina de calcinação dos *pellets* de clínquer está representada na Figura 5. Os *pellets* foram submetidos a uma taxa de aquecimento de 5°C/min, até atingir a temperatura de 900°C, permanecendo nesta temperatura durante 30 minutos para a descarbonatação do calcário. Continuando a segunda etapa de queima, com a mesma taxa de aquecimento, as amostras permaneceram no forno até atingir a temperatura final de 1450°C, permanecendo nesse patamar durante 15 minutos antes de finalizar a queima.

Figura 5 – Rotina de clínquerização no forno LHT 02/17 LB, da marca Nabertherm, até 1450°C.



Fonte: Autores

Foram realizadas três moldagens e três queimas para cada tipo de clínquer, totalizando 18 clínqueres estudados.

Para a avaliação dos clínqueres experimentais, foi feita a identificação da composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX), utilizando um difratômetro D2 *Phaser* (Bruker), com tubo de alvo de cobre (radiação K $\alpha$  com comprimento de onda de 1,54060 Å) de 30 kV e 10 mA, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de 2 $\theta$  de 5° a 90°, varredura com incrementos de 0,02° e tempo de coleta de 0,2 segundos por passo.

As fases cristalinas presentes nos clínqueres foram identificadas com auxílio do *software DIFFRAC plus - EVA*, com base de dados no sistema COD (*Crystallography Open Database*) e quantificadas com o *software TOPAS Acadêmico versão 4.2*, que se baseia no método de *Rietveld* e sistema CIF (*Crystallography Information File*).



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização química das matérias-primas

As composições químicas do FRCC, da argila e do calcário são apresentadas na Tabela 1. Observa-se que o resíduo de construção civil é rico em silício, cálcio, alumínio e ferro, além de outros elementos em menor proporção, como magnésio, enxofre, sódio, potássio e titânio.

Tabela 1 – Caracterização química, em óxidos, obtida por meio de FRX, para o FRCC, o calcário e a argila.

Material	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Outros	PF*
FRCC	42,45	17,50	11,67	4,03	3,44	2,82	1,98	0,86	0,60	0,75	13,90
Argila	58,42	0,26	23,55	4,79	1,18	0,12	-	1,39	1,10	0,35	8,85
Calcário	10,92	44,04	3,20	1,28	2,13	0,10	-	0,58	0,18	0,08	37,50

\*PF = Perda ao fogo

O FRCC apresenta-se como uma fonte de óxido de cálcio contendo 17,5% de CaO, servindo como matéria-prima alternativa ao calcário, principal fonte de cálcio da farinha na fabricação do clínquer.

O FRCC, também, pode ser utilizado como uma fonte de sílica alternativa à argila, pois, possui 42,4% de SiO<sub>2</sub>. Dessa forma, percebe-se que esse FRCC é uma importante fonte alternativa de cálcio e silício, podendo substituir parte do sistema argila-calcário, matérias-primas tradicionais usadas na produção do cimento Portland.

#### 3.2 Dosagem e produção dos clínqueres Portland contendo FRCC

A Tabela 2 apresenta as porcentagens de cada matéria-prima utilizada para a fabricação dos clínqueres experimentais com a incorporação do FRCC e do clínquer de referência (produzido com calcário e argila). Observa-se que foi possível a substituição total da argila por FRCC, incorporando à mistura cerca de 9,5% de FRCC na farinha crua.



Tabela 2 – Percentual, em massa, de cada matéria-prima na composição das farinhas precursoras para produção dos clínqueres experimentais, com FSC fixado em 98% e parâmetros químicos resultantes.

Denominação dos clínqueres	Materiais (%)			Parâmetros químicos		
	Calcário	Argila	FRCC	FSC (%)	MS	MA
REFERÊNCIA	93,20	6,80	-	98	2,35	2,88
FRCC	90,50	-	9,50	98	2,47	2,52

Como o FRCC é fonte alternativa dos principais elementos químicos do clínquer ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sendo uma rica e importante fonte de  $\text{CaO}$ , a incorporação de RCC possibilitou a diminuição de cerca de 3% de calcário na farinha.

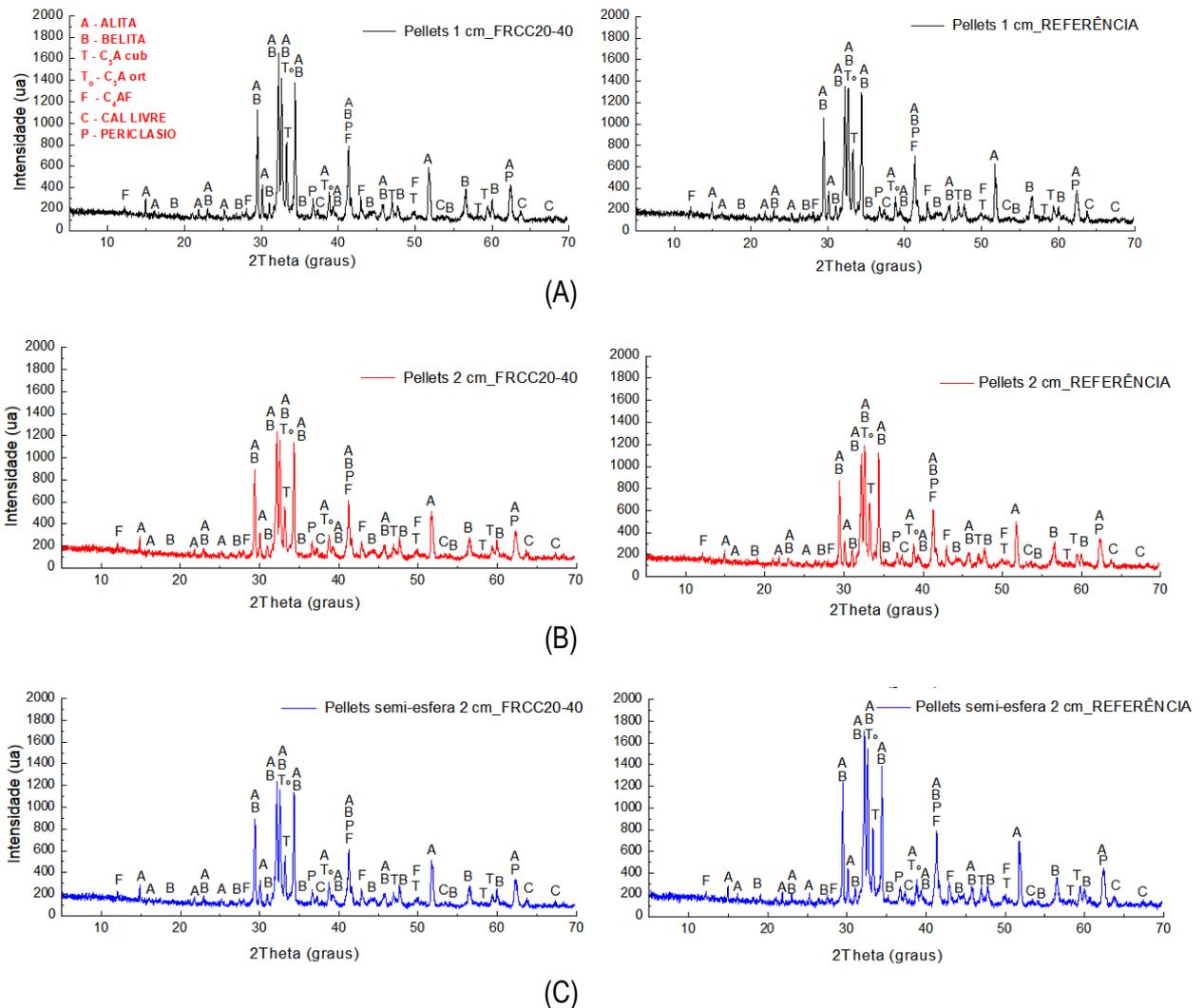
### 3.3 Avaliação dos clínqueres Portland nas três diferentes configurações de moldagem

Os clínqueres nas três diferentes configurações dos *pellets* foram avaliados quanto à composição mineralógica a fim de se verificar a formação das fases cristalinas esperadas ( $\text{C}_3\text{S}$ : Silicato tricálcico -  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ;  $\text{C}_2\text{S}$ : Silicato dicálcico -  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ;  $\text{C}_3\text{A}$ : Aluminato tricálcico -  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; e  $\text{C}_4\text{AF}$ : Ferroaluminato tetracálcico -  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Os difratogramas dos clínqueres de referência, produzidos com calcário e argila, e dos clínqueres com incorporação do RCC são apresentados na Figura 6.

Do ponto de vista mineralógico, na avaliação qualitativa, observa-se que todos os clínqueres produzidos com as três diferentes configurações dos *pellets* apresentaram as fases cristalinas esperadas por meio de picos desenvolvidos, principalmente de alita e belita, fases que devem ser majoritárias. Independente da configuração do *pellet*, as fases minoritárias do clínquer,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ , também foram formadas, como pode ser visto nos difratogramas.



Figura 6 - Análise mineralógica dos clínqueres de referência e contendo FRCC, produzidos com *pellets* de 1 cm (A), de 2 cm (B) e semi-esfera de 2 cm de diâmetro (C).



A quantificação das fases identificadas está apresentada nas Tabelas 3 e 4, onde se verifica que a fase alita está presente em maior quantidade em todos os clínqueres nas diferentes configurações, nos clínqueres de referência bem como nos clínqueres dosados com incorporação do RCC, indicando que os resíduos substituíram adequadamente parte do sistema calcário-argila. Para a produção de cimento Portland, a fase alita deve ser o constituinte majoritário do clínquer, uma vez que dentre os demais componentes do clínquer, esta fase é a que tem maior influência no endurecimento do cimento, sendo responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas nas primeiras idades <sup>(23)</sup>.



**Tabela 3 – Teores de fases cristalinas dos clínqueres experimentais de referência, calcinados à 1450°C, obtidos por meio do método de Rietveld.**

Fases do clínquer	Referência Esfera de 1 cm					Referência Esfera de 2 cm					Referência Semi-Esfera de 2 cm				
	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP
Alita	52,2	56,2	59,3	<b>55,9</b>	3,56	43,7	51,7	55,0	<b>50,1</b>	5,77	48,6	52,7	57,2	<b>52,8</b>	4,30
Belita	26,2	26,2	24,5	<b>25,6</b>	0,97	29,0	28,5	26,3	<b>27,9</b>	1,46	27,8	28,2	26,2	<b>27,4</b>	1,06
C <sub>3</sub> A cúb	12,8	9,8	9,8	<b>10,8</b>	1,71	15,1	11,1	10,4	<b>12,2</b>	2,55	14,7	11,7	10,0	<b>12,1</b>	2,35
C <sub>3</sub> A ort	2,0	1,1	0,8	<b>1,3</b>	0,63	1,1	2,0	1,5	<b>1,5</b>	0,48	3,3	1,2	0,6	<b>1,7</b>	1,41
C <sub>4</sub> AF	3,6	3,5	3,0	<b>3,4</b>	0,30	8,4	3,9	4,1	<b>5,5</b>	2,58	2,7	3,2	3,0	<b>3,0</b>	0,23
Cal livre	0,2	0,3	0,1	<b>0,2</b>	0,10	0,2	0,1	0,2	<b>0,2</b>	0,09	0,2	0,4	0,1	<b>0,2</b>	0,15
Periclásio	2,7	2,8	2,5	<b>2,7</b>	0,14	2,6	2,8	2,7	<b>2,7</b>	0,09	2,7	2,7	2,9	<b>2,8</b>	0,14
<b>GOF*</b>	1,21	1,21	1,25	<b>1,22</b>	0,02	1,25	1,23	1,18	<b>1,22</b>	0,04	1,18	1,17	1,29	<b>1,21</b>	0,07

\*Indicador estatístico que fornece a relação entre os resíduos esperados e os calculados: GOF (*goodnes of fit*) =  $R_{WP}$  (*weighted profile R fator*) /  $R_{exp}$  (*expected R fator*).

E1 a E3 = "esferas" de clínquer / M = média / DP = desvio padrão / C<sub>3</sub>A cúb = C<sub>3</sub>A cúbico / C<sub>3</sub>A ort = / C<sub>3</sub>A ortorrômico.

**Tabela 4 – Teores de fases cristalinas dos clínqueres experimentais com a incorporação de FRCC, calcinados à 1450°C, obtidos por meio do método de Rietveld.**

Fases do clínquer	FRCC <sub>20-40</sub> Esfera de 1 cm					FRCC <sub>20-40</sub> Esfera de 2 cm					FRCC <sub>20-40</sub> Semi-Esfera de 2 cm				
	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP
Alita	61,6	59,1	61,0	<b>60,5</b>	1,27	54,5	58,3	56,6	<b>56,5</b>	1,87	55,8	57,7	58,3	<b>57,2</b>	1,29
Belita	22,2	24,4	21,7	<b>22,8</b>	1,46	26,1	23,6	24,5	<b>24,7</b>	1,29	24,4	23,8	23,7	<b>24,0</b>	0,41
C <sub>3</sub> A cúb	9,6	8,9	9,3	<b>9,3</b>	0,36	10,7	10,1	9,1	<b>10,0</b>	0,80	11,4	11,8	11,7	<b>11,6</b>	0,21
C <sub>3</sub> A ort	0,9	1,4	2,2	<b>1,5</b>	0,65	0,4	1,7	2,8	<b>1,6</b>	1,20	0,7	1,0	0,9	<b>0,9</b>	0,13
C <sub>4</sub> AF	3,1	3,0	3,1	<b>3,0</b>	0,07	4,7	3,2	4,0	<b>3,9</b>	0,75	4,3	2,8	3,0	<b>3,3</b>	0,83
Cal livre	0,0	0,1	0,0	<b>0,0</b>	0,06	0,5	0,4	0,3	<b>0,4</b>	0,12	0,5	0,3	0,1	<b>0,3</b>	0,24
Periclásio	2,6	3,1	2,8	<b>2,8</b>	0,24	3,1	2,8	2,7	<b>2,8</b>	0,18	2,8	2,8	2,4	<b>2,7</b>	0,22
<b>GOF</b>	1,20	1,21	1,23	<b>1,21</b>	0,02	1,22	1,21	1,16	<b>1,20</b>	0,03	1,21	1,23	1,23	<b>1,22</b>	0,01

\*Indicador estatístico que fornece a relação entre os resíduos esperados e os calculados: GOF (*goodnes of fit*) =  $R_{WP}$  (*weighted profile R fator*) /  $R_{exp}$  (*expected R fator*).

E1 a E3 = "esferas" de clínquer / M = média / DP = desvio padrão / C<sub>3</sub>A cúb = C<sub>3</sub>A cúbico / C<sub>3</sub>A ort = / C<sub>3</sub>A ortorrômico.

FRCC<sub>20-40</sub> = Fino de Resíduo de Construção Civil formado a partir de grãos com diâmetro máximo entre 20 a 40 mm.



Entre as três configurações dos *pellets*, os clínqueres com esferas de 1 cm de diâmetro foram os que apresentaram o maior teor de alita, tanto nos clínqueres de referência como nos clínqueres com RCC. Em segundo lugar, o maior teor de alita foi observado nos clínqueres com *pellets* semi-esféricos com diâmetro de 2 cm.

Os clínqueres de referência produzidos com esferas de 1 cm de diâmetro apresentaram teor de alita em média 10,7% superior que os produzidos com esferas de 2 cm de diâmetro, e em média 5,8% superior ao dos clínqueres produzidos com semi-esfera de 2 cm de diâmetro.

Para os clínqueres com incorporação de RCC confeccionados com esferas de 1 cm de diâmetro a diferença média foi de 6,7% e 5,4% a mais de alita que os clínqueres esféricos de 2 cm de diâmetro e semi-esféricos de 2 cm de diâmetro, respectivamente.

A área superficial específica dos *pellets* com 1 cm de diâmetro é, em média, aproximadamente 2,57 cm<sup>2</sup>/g, cerca de 1,4 vezes maior que a área superficial específica dos *pellets* com 2 cm de diâmetro (em média, 1,90 cm<sup>2</sup>/g) e 1,1 vezes maior que a dos *pellets* semi-esféricos (em média 2,32 cm<sup>2</sup>/g).

Já o volume médio dos *pellets* com 2 cm de diâmetro é de 3,495 cm<sup>3</sup>, enquanto o volume dos *pellets* com 1 cm de diâmetro é de 0,529 cm<sup>3</sup>, 6,6 vezes maior, o que resulta numa demanda maior de calor para as mesmas condições de calcinação.

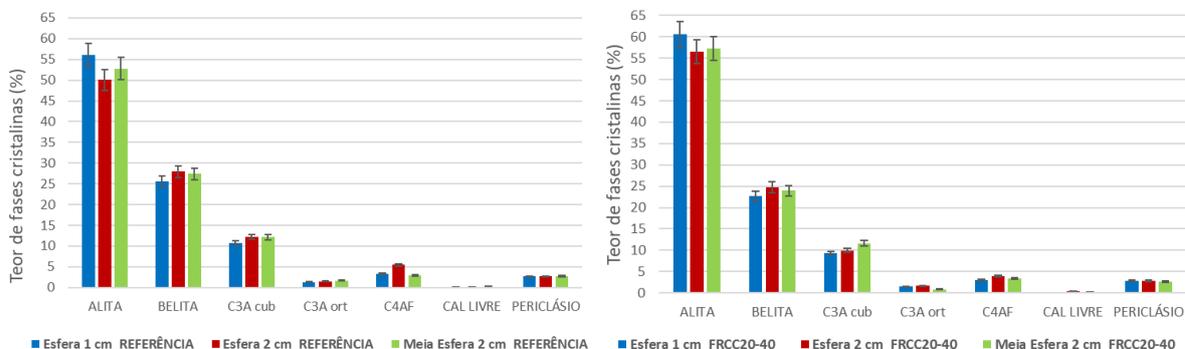
Assim, nos *pellets* com 2 cm de diâmetro existe uma maior dificuldade de transferência de calor durante a clinquerização nas mesmas condições de queima quando comparados com os *pellets* com 1 cm de diâmetro e com meia-esfera. Isso também afeta o resfriamento dos clínqueres, influenciando a formação das fases cristalinas, nessas diferentes configurações das esferas.

A Figura 7 mostra uma comparação dos teores médios das fases cristalinas nos clínqueres experimentais. Percebe-se que as principais fases do clínquer foram formadas em teores semelhantes aos indicados na literatura especializada para classificá-los como clínquer Portland (50 a 70% de alita) <sup>(19)</sup>, mesmo com as diferentes conformações dos *pellets*, de maneira que não afetou negativamente as suas características mineralógicas.

Também, pode-se perceber que os clínqueres produzidos com incorporação de RCC em substituição total à argila e parcial ao calcário apresentaram maior teor de alita, quando comparados com os clínqueres produzidos com as matérias-primas tradicionais (calcário e argila), mostrando que a substituição é viável tecnicamente, possibilitando menores emissão de CO<sub>2</sub> e de exploração de recursos naturais.



Figure 7 – Comparação entre os teores médios de fases cristalinas dos clínqueres experimentais de referência e com FRCC



Diferentemente da produção laboratorial, em que os clínqueres recebem formatos circulares a partir de moldagem pela mistura da matéria-prima com água, para facilitar a conformação, ainda antes de serem calcinados, sendo chamados de *pellets*, na produção industrial, as matérias-primas moídas são colocadas no forno rotativo, em geral à temperatura de cerca de 1450°C, sendo a configuração final do clínquer formada de maneira bastante heterogênea e de medidas diversas, com formatos circulares formados devido à movimentação rotativa do forno.

O clínquer industrial é composto de nódulos arredondados, com estrutura maciça e porosa, variando em tamanho de 1 a 30 mm <sup>(22)</sup>. Durante a calcinação, há uma homogeneidade na transferência de calor nos nódulos, o que não acontece na produção laboratorial, com forno estático, o que proporciona as diferenças nos teores finais das fases cristalinas.

## 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- A área superficial específica dos *pellets* conformados influencia na formação das fases alita e belita, devido a diferenças na área de exposição, durante a sinterização e resfriamento;
- Embora haja diferenças nos teores das fases cristalinas nas diferentes conformações dos *pellets*, observa-se que isso não afetou negativamente as características mineralógicas, uma vez que os teores das principais fases do clínquer, mesmo variando, se manteve dentro dos valores indicados na literatura especializada para classificá-los como clínquer Portland (50 a 70% de alita);



- O uso de moldes padroniza e facilita a moldagem dos clínqueres, aumentando a homogeneidade do material produzido;
- Os clínqueres contendo RCC em substituição total à argila e parcial ao calcário apresentaram composição mineralógica semelhante aos clínqueres de referência.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESB, ao PPEC, à UFRB, à Usina de Valorização de Resíduos Grajaú e à cimenteira, pela doação dos materiais, e as instituições onde os ensaios foram realizados: Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais/UFBA, Laboratório de estruturas (Timoshenko)/UFBA e Instituto Federal de Educação da Bahia.

## 6. REFERÊNCIAS

1. ROADMAP tecnológico do cimento: **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visado e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019, 64 p.
2. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Disponível em: <[http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2019.
3. LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.
4. SILVA, LUIZ RICARDO AMARO DA. **Utilização do entulho como agregado para a produção de concreto reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil); Universidade Federal Fluminense, 2004.
5. SILVA, Guilherme Augusto de Oliveira e. **Avaliação da durabilidade de concre-tos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPEC. Universidade Federal da Bahia, 2017.
6. AMORIM JÚNIOR, N.S.; SILVA, G.A.O.; RIBEIRO, D.V. **Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles**. Construction and Building Materials, 161, p. 723–730, 2018.
7. GALBENIS, Christos-Triantafyllos; TSIMAS, Stamatis. **Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production**. China Particuology, V. 4, N. 2, 83-85, 2006.



8. PUERTAS, F.; Díaz, I. García; BARBA, A.; GAZULLA, M. F.; PALACIOS, M.; GÓMEZ, M. P.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. **Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production**. Cement and Concrete Composites. V. 30, 798–805, 2008.
9. SCHOON, J.; BUYSSER, K.; DRIESSCHE, I.; BELIE, N. **Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production**. Cement and Concrete Composites, Vol. 58, April 2015, p. 70–80, 2015.
10. KIM, Jihoon; TAE, Sungho; KIM, Rakhyun. **Theoretical Study on the Production of Environment-Friendly Recycled Cement Using Inorganic Construction Wastes as Secondary Materials in South Korea**. Sustainability, V. 10, 4449, 2018.
11. AY, Nuran; ÜNAL, Mevlüt. **The use of waste ceramic tile in cement production**. Cement and Concrete Research, V. 30, Issue 3, p. 497-499, 2000.
12. CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. 1993. 155f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1993.
13. MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 188f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2001.
14. COSTA, E. B. da. **Aproveitamento de cinza pesada e anodização do alumínio para a produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2016.
15. MARIANI, B.B.; ANDRADE Neto, J.d.; AMORIM Júnior, N.S.; RIBEIRO, D.V. **Utilization of waste from TiO<sub>2</sub> production for Portland cements obtention**. In: 7th International Congress on Ceramics, 2018, Foz do Iguaçu. Proceedings of 7th International Congress on Ceramics, 2018. V. 7. p. 194-194.
16. COSTA, E. B. da. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2013.
17. VILAPLANA, A. S.G.; FERREIRA, V. J.; SABIRÓN, A.M.L.; ARANDA-USÓN, A.; LAUSÍN-GONZÁLEZ; BERGANZA-CONDE, C.; FERREIRA, G. **Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement**. Construction and Building Materials, V. 94, N° 30, p. 837-843, 2015.
18. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 307. **Diretrizes e procedimentos para gestão dos resíduos de construção**. Brasília, 2002.
19. TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2.ed. London: Thomas Telford, 1997. 476p.
20. SCHOON, J.; HEYDEN, L. V.; ELOY, P.; GAIGNEUX, M.; BUYSSER, K.; DRIESSCHE, I.; BELIE, N. **Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production**. Construction and Building Materials, Vol. 36, p. 391-403, 2012.
21. RODRÍGUEZ, N.H.; RAMÍREZ, S.M.; VARELA, M. T. B.; DONATELLO, S.; GUIL-LEM, M.; PUIG, J.; FOS, C.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. **The effect of using thermally dried sewage**



- sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production.** Journal of Cleaner Production, V. 52, N° 01, p. 94-102, 2013.
22. WINTER, Nicholas B. **Understanding Cement: An introduction to cement production, cement hydration and deleterious process in concrete.** WHD Microanalyses Consultants. Rendlesham, Woodbridge, UK. 2012.
23. ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** V. 2, São Paulo: IBRACON, 2005.



# COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO E TÉRMICO DE PLACAS CIMENTÍCIAS COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU PARA USO EM FORROS DE EDIFICAÇÕES

**Enilda Maria da Silva Garcia de Freitas <sup>(1)</sup>; Douglas Sousa Tosta <sup>(2)</sup>;  
Saulo Güths <sup>(3)</sup>; Ana Paula Milani <sup>(4)</sup>**

(1) UFMS – enilda.msgfreitas@gmail.com; (2) UFMS – douglastosta85@gmail.com; (3) UFSC – saulo@lmpt.ufsc.br; (4) UFMS – ana.milani@ufms.br

## RESUMO

Produtos cimentícios com borracha de pneus inservíveis sem função estrutural têm-se mostrado viáveis para a aplicação na construção civil devido ao aumento da ductibilidade e à baixa condutividade térmica em vistas aos concretos e argamassas convencionais. Assim, o presente trabalho buscou estudar argamassas compostas pelas matérias-primas cimento-areia-resíduos de borracha de pneus inservíveis para a confecção de placas de forros com características de melhoramento térmico de edificações. Após a caracterização física dos materiais e estudo de dosagem do compósito cimentício com resíduos de borracha, foram realizados ensaios de caracterização físico-mecânica das placas cimentícias com borracha e verificado o seu comportamento térmico quando aplicadas como forro de cobertura de habitações. Foram encontrados resultados que validam mecanicamente a utilização de traços de argamassa cimentícia com até 15% de adição de resíduos borracha de pneus, o que a torna um produto tecnicamente viável para fabricação de placas pré-fabricadas por vibração e melhor comportamento térmico ao compará-lo com placas de argamassas cimentícias convencionais.

**Palavras-chave:** placas cimentícias, desempenho, argamassa com borracha de pneu inservível

## PHYSICAL - MECHANICAL AND THERMAL BEHAVIOR OF CEMENT PLATES WITH RUBBER TIRE RESIDUE FOR USE IN BUILDING LININGS

### ABSTRACT

Cemented products of non-structural function made from unserviceable rubber tire have proved to be viable application in civil construction due to the increased ductility and the low thermal conductivity in concrete and conventional mortars. Thus, the present study sought to study mortars composed of raw materials cement, sand and unserviceable rubber tire residue for the production of linings plates with thermal improvement characteristics for buildings. After the physical characterization of the materials and the dosage study of the cementitious composite with rubber, physical-mechanical characterization tests were carried out on the cementitious plate made from unserviceable rubber tire and verified its thermal behavior when applied as lining. Results were obtained that mechanically validate the use of cementitious mortar with up to 15% addition of unserviceable rubber tire, which makes it a product technically feasible in manufacturing prefabricated plates by vibration and better thermal behavior when compared to conventional cementitious mortar plates.

**Keywords:** cement slabs, performance, mortar with unserviceable tire rubber



## 1. INTRODUÇÃO

Há várias tecnologias de destinação final para os pneus inservíveis, mas a tecnologia mais usual no Brasil é o coprocessamento, que consiste na utilização de pneu triturado para fonte de calor em cimenteiras. Aproximadamente 60% dos pneus inservíveis são destinados para tal finalidade (IBAMA, 2017)<sup>(1)</sup>. O coprocessamento, embora seja uma destinação ambientalmente correta, é um manejo que gera controvérsias, uma vez que não se sabe ao certo se a queima do pneu, mesmo em alta temperatura de combustão, não gera toxinas que podem afetar o ambiente e a saúde humana (FIKSEL et al, 2010)<sup>(2)</sup>. Assim, o reuso “in natura” de borracha de pneus inservíveis viabiliza uma nova fonte de agregados para a construção civil e fornece uma metodologia limpa para destinação dos pneus inservíveis, poupando recursos naturais (GUELMINE et al., 2016)<sup>(3)</sup>.

Dessa forma, é necessário investigações para o desenvolvimento de materiais de construção a partir da incorporação da borracha de pneus inservíveis em compósitos cimentícios sem função estrutural. Dentre as características físicas e mecânicas, destaca-se a diminuição na densidade quando comparado aos compósitos com agregados naturais devido às partículas de borracha possuir massa específica menor que a brita e areia natural, e conseqüentemente, aumento da porosidade do produto final (FLORES - MEDINA et al., 2013)<sup>(4)</sup>.

Apesar das consideráveis perdas de resistência mecânica com a incorporação de partículas de borracha de pneus inservíveis em argamassa e concreto, foi constatada por Shah et al. (2014)<sup>(5)</sup> e Turgut et al. (2008)<sup>(6)</sup> o aumento da resistência térmica destes compósitos com aumento do teor de borracha. Os referidos autores atribuíram a melhor resistência térmica do concreto com borracha à baixa condutividade térmica dos agregados de borracha e ao aumento da porosidade do material.

Analisando o cenário do Brasil, um dos responsáveis pela elevação da temperatura interna em edificações térreas acontece por meio da cobertura, principalmente devido a exposição da superfície a radiação solar. Estas habitações quando não são providas de forro ou laje para separar o ático do restante da casa ficam mais susceptíveis ao desconforto térmico. Entretanto, a busca por materiais que amenizam a transferência de calor do meio externo (cobertura) ao meio interno, se faz necessário para proporcionar o conforto térmico e reduzir o consumo de energia consumido com equipamentos de condicionamento térmico (MICHELS et al, 2007)<sup>(7)</sup>.

Turgut et al. (2008)<sup>(6)</sup> destacando a baixa massa específica e o bom desempenho térmico dos compósitos cimentícios com borracha de pneu quando comparados aos compósitos cimentícios



convencionais indicam que este material de construção apresenta grande potencial na produção de fechamentos (sem função estrutural) em moradias sociais. Outra sugestão apontada por Shah et al. (2014)<sup>(5)</sup> é o uso de concreto com borracha de pneu em capas de lajes de cobertura como alternativa para melhorar o desempenho térmico em edificações.

Portanto, os elementos construtivos de compósitos cimentícios com borracha tendem a apresentar melhores propriedades termofísicas que os materiais convencionais de concreto e argamassa quando submetidos ao processo de transferência de calor. Logo, obter uma mistura adequada de argamassa adicionada de borracha de pneus inservíveis para a confecção de placas de vedação com características de isolamento térmico de edificações pode contribuir com os estudos de aplicabilidade de produtos alternativos para a eficiência energética da construção civil.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção das argamassas foram utilizados cimento Portland CP V ARI, areia natural de Campo Grande/Brasil e partículas de borracha de pneus inservíveis processadas em empresa recicladora deste passivo ambiental, por meio de trituração mecânica “in natura” de pneus, ou seja, sem nenhum processo de lavagem ou tratamento físico ou químico da superfície.

A caracterização física da areia e das partículas de borracha foram realizadas conforme as normas ABNT NBR NM 45:2006<sup>(6)</sup> para determinação da massa unitária e ABNT NBR NM 248:2003<sup>(9)</sup> para a análise granulométrica. Quanto às massas específicas, a areia natural foi ensaiada conforme a ABNT NBR NM 52:2009<sup>(10)</sup>. Já para as partículas de borracha utilizou-se da ABNT NBR 16605:2017<sup>(11)</sup> com uso do querosene.

O estudo de dosagem das argamassas foram nas proporções 1:4 e 1:6 (cimento:areia), em massa, pois segundo Pinto e Fioriti (2016)<sup>(12)</sup> e Guelmine (2016)<sup>(3)</sup>, com traços de referência nas proporções 1:3 e 1:5 (cimento: areia) para argamassas de revestimento com adição de borracha obtiveram interação físico-mecânica adequada entre as partículas de borracha com a pasta cimentícia.

Os teores de partículas de borracha adicionados no volume total dos componentes anidros foram de até 20% (Tabela 1) baseado nos resultados obtidos por Benazzouk et al. (2008)<sup>(13)</sup>, que puderam constatar perdas de resistência mecânica acentuadas em compósitos com adições de borracha acima de 20%.



A relação água/cimento foi determinada visando a consistência ideal para posterior moldagem das placas cimentícias, como observado por Canova et al. (2007)<sup>(14)</sup> em seus estudos com argamassa de borracha de pneu para revestimento com adequado índice de consistência entre 250 mm a 260 mm. Assim, para o presente estudo de dosagem adotou-se um índice de consistência de  $260 \pm 5$  mm.

Tabela 1 – Estudo de dosagem das argamassas cimentícias com borracha

Traço identificação*	Cimento (g)	Areia natural (g)	Partículas de borracha (g)	Traço unitário (em massa) (cimento:areia:borracha:água)
R_4-0%	500,00	2000,00	-	1:4:0:0,80
R_4-5%	500,00	2000,00	47,2	1:4:0,09:0,83
R_4-10%	500,00	2000,00	94,4	1:4:0,19:0,86
R_4-15%	500,00	2000,00	141,6	1:4:0,28:0,89
R_4-20%	500,00	2000,00	188,9	1:4:0,38:0,91
R_6-0%	357,14	2142,84	-	1:6:0:1,21
R_6-5%	357,14	2142,84	46,4	1:6:0,13:1,22
R_6-10%	357,14	2142,84	92,8	1:6:0,26:1,24
R_6-15%	357,14	2142,84	139,2	1:6:0,39:1,27
R_6-20%	357,14	2142,84	185,5	1:6:0,52:1,30

\*A nomenclatura das amostras foi dada da seguinte forma: R\_(traço)-(% de adição)

Foram moldados 3 amostras prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm conforme a ABNT NBR 13279:2005<sup>(15)</sup> para cada mistura, sendo avaliado, aos 7 dias de idade, as resistências à tração na flexão e à compressão simples. Também foram realizados os ensaios físicos de densidade de massa e o teor de ar incorporado conforme ABNT NBR 13278:2005<sup>(16)</sup> e de capacidade de absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas conforme descrições da ABNT NBR 9778:2005<sup>(17)</sup>.

Para a análise do comportamento físico-mecânico e verificação de viabilidade técnica da fabricação das placas cimentícias, foi realizado a avaliação da resistência à tração na flexão em placas de argamassas com borracha aos 7 e 28 dias de idade conforme ABNT NBR 13279:2005<sup>(15)</sup>, sendo o vão adotado entre os apoios inferiores (2 cutelos) da máquina de ensaio baseado na relação obtida



entre o vão adotado pela norma citada e o comprimento do prisma, resultando em 20 cm de vão. As placas cimentícias com borracha foram produzidas nas dimensões de 30 cm x 10 cm x 3 cm e seguindo o método de distribuição da argamassa na fôrma com aplicação do adensamento mecânico através da mesa vibratória e tempo de vibração controlado através do surgimento de bolhas de ar na superfície da argamassa (Figura 1).

Figura 1 – Processo de fabricação da placa por vibração e ensaio mecânico



Contudo, para atender o menor consumo de cimento aliado a maior adição de borracha e a resistência de tração na flexão mínima de 4 MPa para forros cimentícios apontada pela ABNT NBR 15498:2016<sup>(18)</sup>, e conseqüentemente na adoção da dosagem para a produção das placas cimentícias com borracha, foi executado um estudo estatístico por meio de análise de variância (ANOVA) e delineamento experimental em esquema fatorial por meio do teste de Tukey. Após análise estatística conciliado com a consistência ideal para a produção das placas por vibração, o consumo de cimento mínimo obtido foi de 396,89 kg/m<sup>3</sup> e relação água/cimento de 0,70. Desta forma, o ajuste da dosagem esta apresentado na Tabela 2, sendo que os teores de borracha incorporados foram em substituição ao volume de areia, correspondendo aos teores de 0%,10% e 15%. Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados de forma análoga ao estudo de dosagem inicial.

Tabela 2 – Dosagem das argamassas adotadas para placa cimentícia com borracha

Traço unitário (em massa) (cimento: areia: borracha:água)	Teor de borracha	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Borracha (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )
1: 3,94:0:0,70 (referência)	0%	396,39	1561,78	-	277,47
1:3,56:0,19:0,70	10%	396,89	1412,93	75,41	277,82
1:3,38:0,28:0,70	15%	396,85	1341,35	111,12	277,80



Para a análise do comportamento térmico das placas cimentícias com borracha foram realizadas simulações termoenergéticas com o programa *EnergyPlus* na versão 8.9.0, a partir do projeto representativo de habitação unifamiliar, faixa 1, definidos por Triana, Lamberts e Sassi (2015)<sup>(19)</sup> na análise de 11 projetos usados por companhias de habitação e agentes públicos nacionais no Programa Minha Casa Minha Vida. Assim, a edificação utilizada como modelo base para o estudo apresenta 39,72 m<sup>2</sup> (sala/cozinha - *Living* = 17,83 m<sup>2</sup>; Quarto1 = 8,06 m<sup>2</sup>; Quarto2 = 7,54 m<sup>2</sup>; Banheiro = 4,08 m<sup>2</sup> e corredor de circulação entre os quartos de 2,21 m<sup>2</sup>), com pé direito de 2,5 m. Foram definidas as zonas térmicas *Living*, Quarto1, Quarto2, Banheiro; com cobertura de 2 águas com ático e forro (Inclinação: 23,6°) em telhamento cerâmico; aberturas sem sombreamento, janelas do *living*, dormitórios e cozinha de 1,50 m<sup>2</sup> com 2 folhas e Fator de Ventilação (FV) = 0,45; basculante no banheiro com 0,48 m<sup>2</sup> e FV = 0,90; beiral de 50 cm; pé direito de 2,50 m e piso cerâmico de 1 cm de espessura com argamassa de regularização de 2 cm e junta.

As simulações termoenergéticas das placas cimentícias com borracha de pneus inservíveis quando aplicadas como forro de edificações foram a partir do modelo base acima descrito e adotadas as seguintes variáveis para as simulações: tipo de parede, cor da telha, tipo de forro e orientação solar (Tabela 3).

Destacam-se as características de transmitância (U) e de capacidade térmica (C) das placas cimentícias com borracha, as quais foram calculadas a partir do resultado experimental de condutividade térmica realizado através dos procedimento da norma técnica ISO 8301:2010<sup>(20)</sup>, como também foi adotado a espessura de 3 cm para a placa de forro conforme a viabilidade técnica de manuseio, transporte e assentamento desta placa em uma edificação por dois trabalhadores.

**Tabela 3– Variações de cobertura e paredes**

Componentes	Forro e Parede			Cobertura	
	Descrição	U (W/m <sup>2</sup> . K)	C (KJ/m <sup>2</sup> .K)	Cor	Absortância(α)
Forro com ático	Laje-forro maciça de concreto com espessura de 10 cm (LC)	2,05	237,5	Marfim Acrílica Fosca	0,267
	Forro de placa cimentícia com 15% de borracha de pneu com espessura de 3 cm (PCB15)	2,16	68,2	Telha Acrílica Fosca	0,708
	Forro de PVC com espessura de 1 cm (PVC)	2,08	30,0	Marfim Semi – Brilho	0,339



Parede	Parede de 13,0 cm, de blocos cerâmicos de 8 furos, com dimensões 9,0 cm x 19,0 cm x 19,0 cm com 2 cm de reboco	2,43	128,0	Telha Semi – Brilho	0,696
	Parede monolítica de concreto com 10 cm de espessura	4,40	220,0	-	-

A edificação foi simulada para a cidade de Corumbá (zona bioclimática 8), cujo o clima é peculiar na região sul matogrossense. A orientação solar considerada foi compreendida entre Norte, Noroeste e Oeste, pois Almeida (2017)<sup>(21)</sup>, após realizar o estudo comparativo de carga térmica solar com alteração de variáveis de edificação em um ambiente envidraçado na cidade de Campo Grande concluiu que o maior ganho de calor (sol de verão) ocorrem nesta três orientações em ordem crescente.

A edificação foi considerada naturalmente ventilada, acontecendo 24 horas ao longo do ano, as janelas permanecem abertas, desde que a temperatura externa não seja inferior a 20°C. A edificação foi definida em um total de quatro pessoas para ocupação, duas para cada quarto e o sistema de iluminação possui o total de 107,0 W para o Living , 78 W para os quartos e o equipamento elétrico foi disposto somente para o *Living*, num total de 26,7 W.

Deste modo, foram realizadas 72 simulações – 4 (tipo de absorvância solar) x 3 (tipo de forro) x 3 (orientação solar) x 2 (tipo de parede), sendo analisado o conforto térmico por meio do graus hora de resfriamento (GHR) considerando o limite de 26°C. Outro indicador de desempenho térmico das placas cimentícias com borracha diante as simulações foi a diferença horária alcançada com as máximas de temperatura do ar externa e interna de cada ambiente de ocupação resultando na análise de atraso térmico.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Estudo de dosagem

Na Tabela 4 segue a caracterização da areia e da partícula de borracha utilizada na composição das argamassas cimentícias.



**Tabela 4 - Caracterização dos materiais**

Materiais	Massa específica (g/m <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro Máximo (mm)	Módulo de Finura
Areia	2,65	1540,00	0,60	1,16
borracha de pneu	1,32	541,17	2,36	3,31

A Tabela 5 mostrou que, independentemente do tipo de traço da argamassa, quanto maior o aumento da adição de borracha, maior foi a queda de resistência à compressão simples e a flexão, sendo significativas estatisticamente tais reduções de resistência mecânica. Tal comportamento se assemelha ao encontrado por Thomas *et al.* (2016)<sup>(22)</sup>, a qual observaram uma redução nos resultados de resistência a compressão e flexão de concretos com borracha. Também, foi possível constatar uma maior incorporação de ar nos traços com maior quantidade de partículas de borracha e diminuição de sua massa específica aparente, corroborando estudos de Flores-Medina (2013)<sup>(4)</sup> e Angelin *et al.* (2017)<sup>(23)</sup>.

**Tabela 5 – Comportamento físico - mecânico**

Tratamento	Flexão (MPa) – 7dias		Compressão <sup>(1)</sup> Média (MPa)	Massa Específica <sup>(1)</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Ar <sup>(1)</sup> incorporado(%)
	Prismáticos (4x4x16cm <sup>3</sup> )	Placas <sup>(1)</sup> (30x10x3cm <sup>3</sup> )			
4-0	5,6 a*	4,3	20,7	2,10	7,35
R_4-5	4,4 b	-	13,4	-	-
R_4-10	3,7 c	2,83	8,5	1,90	12,50
R_4-15	3,3 d	-	7,9	-	-
R_4-20	2,8 e	1,74	7,3	1,81	14,90
R_6-0	3,3 a	2,27	8,3	2,04	13,00
R_6-5	2,6 b	-	6,6	-	-
R_6-10	2,2 c	1,59	5,4	1,87	19,50
R_6-15	1,9 d	-	3,6	-	-
R_6-20	1,8 d	1,39	3,7	1,42	22,0

\*Letras minúsculas na coluna não diferem estatisticamente entre si.



A análise de variância das dosagens das argamassas cimentícias com borracha mostrou que o cimento é o fator mais relevante na eficácia das misturas em relação às resistências mecânicas. Isto ocorre porque a matriz preponderante dentro da argamassa foi o cimento e as adições de partículas de borracha não são significativas estatisticamente quando adicionado o teor máximo de 20% do volume final em relação à proporção de areia na argamassa.

### 3.2 Comportamento físico-mecânico das placas cimentícias com borracha

Do mesmo modo que ocorreu no estudo de dosagem, foi possível constatar na Tabela 6 maiores valores de incorporação de ar e de índice de consistência nas misturas com maior quantidade de partículas de borracha, ou seja, quanto maior foi o teor de ar incorporado, menor foi a densidade da argamassa com borracha e melhor foi a sua trabalhabilidade; características, estas, observadas também por CARASECK et al. (2008)<sup>(24)</sup> em argamassas cimentícias. Já o fato das diferenças não significativas entre os resultados de índice de vazios das misturas pode ser atribuído ao adensamento mecânico por vibração durante a moldagem das placas, a qual permitiu a saída do ar, facilitou o arranjo interno dos agregados e partículas de borracha, e conseqüentemente, diminuiu os vazios internos da matriz.

Quanto ao ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas, as misturas com borracha tiveram melhor desempenho quando comparados com o traço referência (0% borracha), pois ascensão de água por capilaridade das argamassas sem borracha de pneu obtiveram subida de água em 100% no corpo de prova. O incremento na incorporação de ar nas argamassas com borracha de pneu criam microbolhas que interrompem os capilares, impedindo que a água percole por eles, assim criando um melhor desempenho (MAIO et al., 2018)<sup>(25)</sup>.

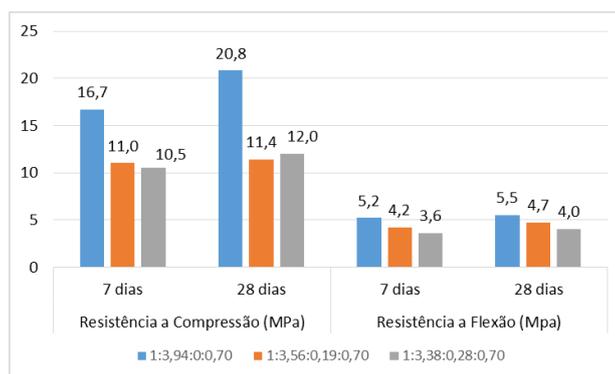
Tabela 6 – Comportamento físico das argamassas

Traço Unitário (cimento: areia: borracha: A/C)	IC (mm)	Teor de ar Incorporado (%)	Absorção da água por imersão (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Índice vazios (%)
1:3,94:0:0,70	216,20	9	10,21	1,84	18,79
1:3,56:0,19:0,70	226,17	11	11,10	1,73	19,20
1:3,38:0,28:0,70	242,17	16	11,80	1,69	19,92



Nota-se na Figura 2 que quando assumido o consumo de cimento de 396,89 kg/m<sup>3</sup>, as argamassas cimentícias com borracha atingiram valores maiores ou iguais a 4 MPa na resistência a flexão aos 28 dias, embora com redução significativa de resistência mecânica quando comparada a argamassa tradicional, corroborando os resultados apresentados no estudo de dosagem.

Figura 2 – Comportamento mecânico das placas



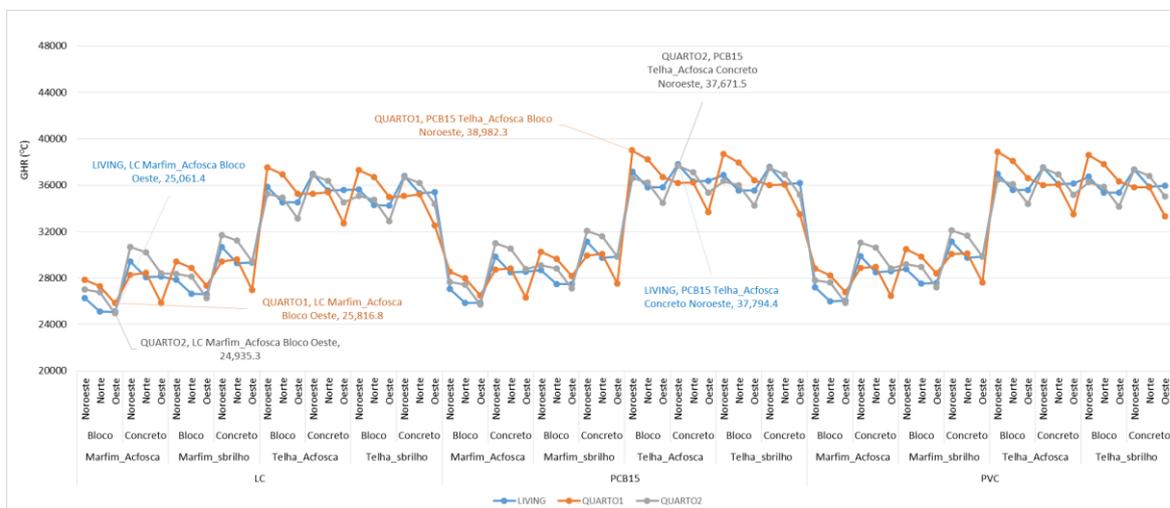
### 3.3 Comportamento térmico das placas cimentícias com borracha

Os valores de condutividade térmica foram de 1,17 W/mK para a argamassa referência (0% borracha), de 0,955 W/mK para a argamassa com 10% de borracha e de 0,922 W/mK para a argamassa com 15% de borracha; sendo observada redução significativa de condução térmica da argamassa com borracha quando comparada a argamassa tradicional. Isto se deve ao incremento de porosidade que favorece a diminuição da condutividade térmica nos compósitos cimentícios (SAHA, 2019)<sup>(26)</sup>.

A Figura 3 apresenta os resultados dos graus horas para resfriamento (GHR) das 72 combinações e o maior valor de GHR ocorreu no quarto1, com a envoltória composta por parede de bloco cerâmico, cobertura com forro de PCB15 e orientação solar Noroeste. Independentemente do tipo de parede, a cor marfim do telhamento ( $\alpha = 0,708$ ) se mostrou significativa na composição de menor valor de GHR em todos os ambientes. Quando foi avaliado a influência do tipo de forro por ambiente de permanência, embora o forro laje de concreto esteve presente em todos os cenários com o menor valor de GHR, é possível notar que os patamares para todos os forros tiveram valores de GHR próximos, denotando um desempenho térmico semelhante dos demais forros na interação com as envoltórias parede e cobertura.



Figura 3 – Extremos do GHR para os ambientes simulados



O arquivo climático utilizado foi *Typical Meteorologica Year* (TMY) com 12 meses do ano a partir de meses típicos dos anos de 2004 a 2017 de toda série de dados disponíveis resultou em um ano hipotético. Tal escolha foi devida a falta de arquivo climático com um ano típico para a cidade de Corumbá - MS.

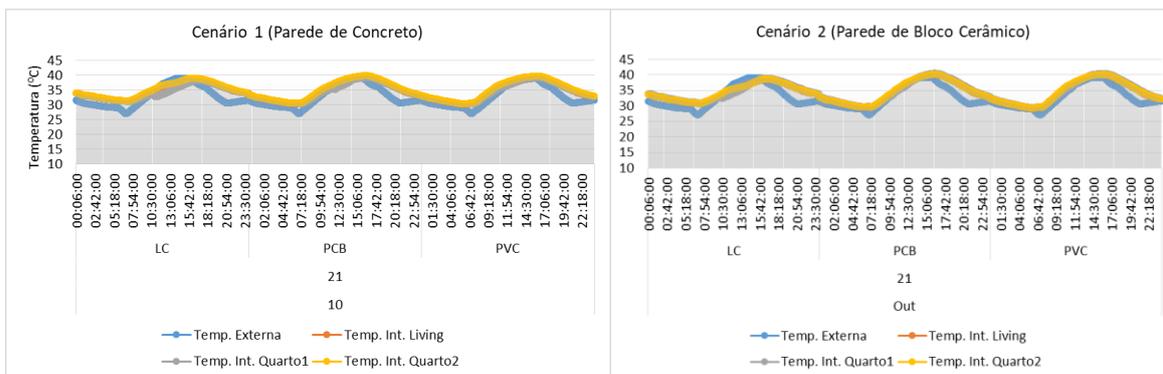
Nas simulações foi observado que em outubro foi alcançado os maiores picos nas temperaturas para estação quente, com 40°C para máxima e mínima de 14,9° C, resultando uma amplitude térmica de 25,1°C. Logo, foi escolhido este período, sendo analisado o dia 21/10. Para verificar o atraso térmico proporcionado pelo tipo de forro nas zonas de ocupação, os seguintes cenários foram analisados: 1 – cobertura de telhas revestidas acrílico fosca, rotação solar com fachada voltada a Noroeste e parede monolítica de concreto; 2 - de forma análoga ao cenário 1, porém com parede de blocos cerâmicos. As escolhas destes cenários foram pela presença de maiores valores de GHR.

Para o cenário 1, a temperatura máxima externa foi às 14h00min com 39°C e as temperaturas máximas internas ocorreram as 16h10min em todo ambiente de permanência com forro de PVC e forro de PCB15, exceto no quarto1 com laje de concreto que ocorreu as 17h00min, registrando assim, um atraso térmico para a edificação com parede de concreto de 2h10min para os forros de PVC e de PCB15 e de 3h para o forro LC. Já para o cenário 2, houve uma inversão entre os ambientes, quando foi contabilizado para quarto2 com parede de bloco cerâmico o atraso térmico de 3h com forro LC. E



para os demais forros, o atraso térmico de 2h10min para o forro de PCB15 e de 1h30min para o forro de PVC.

Figura 4 – Análise de atraso térmico



Apesar dos valores de transmitância térmica dos forros em estudo serem similares, a massa térmica dos materiais cerâmicos influenciam positivamente no ganho de horas no atraso térmico dos ambientes, sendo destacado o menor atraso térmico para o forro de PVC quando comparado ao PCB15 e LC. Assim, apesar do amortecimento térmico não ser evidenciado nos ambientes analisados, as horas de atraso térmico proporcionado pelo forro de PCB15 é relevante para o alcance de melhor conforto térmico para o usuário da edificação em vista do uso corrente e tradicional do forro de PVC.

## 4. CONCLUSÕES

Portanto, a dosagem adequada para fabricação de forro de placa cimentícia com borracha é o consumo de cimento de 396,89 kg/m<sup>3</sup> e relação água/cimento de 0,70, com máximo de 15% de substituição de areia por partículas de borracha de pneu inservível na dimensão máxima das partículas de 2,4 mm com moldagem por meio de vibração. Desta forma, pode-se produzir placas pré-fabricadas com 3 cm de espessura e massa específica de 1,69 g/cm<sup>3</sup>, o que dispensa o manuseio e transporte por equipamentos pesados e atende a NBR 15495 (2016) em relação a resistência a flexão de 4 MPa para placas cimentícias de vedação. Embora há redução na condutividade térmica das placas cimentícia com borracha quando comparadas as placas de argamassa convencional, a maior influência no comportamento térmico é no ganho de horas de atraso térmico dos ambientes quando comparados aos tradicionais forros de PVC.



## 5. REFERÊNCIAS

1. IBAMA. **Dados estatísticos da reciclagem de pneus no Brasil**. Brasília, 3p, 2017.
2. FIKSEL, J.; BAKSHI, B. R.; BARAL, A.; GUERRA, E. & DEQUERVAIN, B. Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. **Clean Technologies and Environmental Policies**, Article in Press, 2010.
3. GUELMINE, L.; HADJAB, H.; BENAZZOUK, A. Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. **Construction and Building Materials**. v. 126, p. 77-85, 2016.
4. FLORES-MEDINA, D.; MEDINA, N. F. Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate um dry consistency concretes. **Materials and Structures**, 2013.
5. SHAH, S. F. A.; NASEER, A.; SHAH, A. A.; ASHRAF, M. **Evaluation of Thermal and Structural Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate** © King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia. 2014.
6. TURGUT P.; YESILATA B; Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks. **Energy and Buildings**. v. 40, p. 679- 688, 2008.
7. MICHELS, C. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2007.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregado – Determinação da massa unitária e dos volumes de vazios - Elaboração. Rio de Janeiro, 2006.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregado – Determinação da composição granulométrica – Elaboração. Rio de Janeiro, 2003.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 52**: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica aparente – Elaboração. Rio de Janeiro, 2009.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica – Elaboração. Rio de Janeiro, 2017
12. PINTO, N. A.; FIORITI C. F. **Desempenho de Argamassas de Revestimento Produzidas com Borracha de Pneus**. Mix Sustentável, 60-66, 2016
13. BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; MEZREB, K.; LAIDOUDI, M.; QUÉNEUDEK, M. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modellig. **Construction and Building Materials**. v. 22. P. 573-579, 2008.
14. CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; DE ANGELIS, G. **A Utilização de Resíduos de Pneus Inservíveis em Argamassa de Revestimento**. Acta Scientiarum 29, 141-149, 2007.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento- Resistência à tração na flexão e a compressão – Elaboração. Rio de Janeiro, 2013
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento ar incorporado - Elaboração. Rio de Janeiro, 2005.



17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9979**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – Elaboração. Rio de Janeiro, 2005
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: Placas de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio – Elaboração. Rio de Janeiro, 2016.
19. TRIANA, A.M; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterization of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy and Buildings**, v. 87, p. 524-541, 2015.
20. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Thermal insulation – Determination of steady – state thermal resistance and related properties** – Heat flow meter apparatus: ISO 8301, 1991.
21. ALMEIDA, O. F. L. **Análise comparativa de cargas térmicas solares em fachada envidraçada para estudo em eficiência energética**. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Programa de Pós – Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade – PPGES. Campo Grande, 2017.
22. THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **Journal of Cleaner Production**. v. 113, p. 86-92, 2016.
23. ANGELIN, A. F. ; LINTZ, R. C. C.; GACHET-BARBOSA, L. A. ; OSÓRIO, W. R. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar (with recycled rubber). **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 534-545, 2017.
24. CARASECK, H. et al. **Influência da Umidade nas Propriedades dos Revestimentos de Argamassa**. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Fortaleza, 2008.
25. MAIO, L. D; COPPOLA, B.; MICHEL, L. C. F.; INCARNATO, L.; SCARFATO, P. Data on thermal conductivity, water vapour permeability and water absorption of a cementitious mortar containing end-of-waste plastic aggregates. **Data in Brief**. v.18. P. 1057-1063, 2018.
26. SAHA, A. K.; SARKER, P. K.; GOLOVANEVSKIY, V.. Thermal properties and residual strength after high temperature exposure of cement mortar using ferronuckel slag aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 199, p. 601-612, 2019.



## UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

**Thomas Schatzmayr Welp Sá<sup>(1)</sup>; Romildo Dias Toledo Filho<sup>(2)</sup>; Sandra Oda<sup>(3)</sup>; Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar<sup>(4)</sup>**

(1) COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: thomas.sws@poli.ufrj.br; (2) COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: toledo@coc.ufrj.br; (3) POLI - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: sandraoda@poli.ufrj.br; (4) FAU - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: vivian@coc.ufrj.br

### RESUMO

Os rompimentos das barragens de Mariana, em 2015, e de Brumadinho, em 2019, colocou em questionamento o método de disposição dos rejeitos de mineração por barragens. O reuso e a reciclagem dos rejeitos são alternativas que podem reduzir os impactos ambientais relacionados à sua destinação, promovendo o desenvolvimento sustentável. As obras de pavimentação requerem um elevado consumo de materiais em suas camadas estruturais. A incorporação de rejeitos de mineração em camadas dos pavimento – como na base, sub-base e reforço de subleito –, tem o potencial de reduzir o consumo de recursos naturais, promover um novo destino aos rejeitos de mineração, e, possivelmente, de reduzir os custos relacionados às obras de pavimentação. Para um bom desempenho dos pavimentos, é necessário avaliar o comportamento dessas misturas em cada camada, verificando se atendem aos requisitos estabelecidos pela especificação técnica vigente. Este trabalho tem como objetivo avaliar misturas de solo-cimento com diferentes proporções de solo e rejeitos de minérios de ferro. Os resultados dos ensaios mostram que as misturas de solo-cimento com rejeito podem ser uma excelente alternativa como material para pavimentação.

**Palavras-chave:** rejeitos de minério de ferro; reciclagem de rejeitos; solo-cimento; obras de pavimentação.

## UTILIZATION OF IRON ORE TAILINGS IN STRUCTURAL LAYERS OF PAVEMENTS

### ABSTRACT

Mariana's dam collapse, in 2015, and Brumadinho's, in 2019, puts the dam disposal method in a questionable position. The reuse and recycle of mining tailings are alternatives that could reduce the environmental impact related to its destination, and, also, to promote a sustainable development. Pavements constructions requires a high amount of materials on its structural layers. The incorporation of mining tailings in pavement layers, such as base, subbase and subgrade, have the potential to reduce the natural resources consumption, to promote a new destination to the mining tailings, and, possibly, to reduce the costs related to pavement construction. For a good pavement performance, each layer must attend the requirements established by the technical specification, and, therefore, it is necessary to evaluate the behavior of these mixtures, verifying if those requirements are attended. This article aims to evaluate soil cement mixtures with different proportions of soil and iron ore tailings. The results show that soil cement mixtures with iron ore tailings can be an excellent alternative as a pavement material.

**Key-words:** iron ore tailings, mining tailings recycle, soil cement, pavement construction.



## 1. INTRODUÇÃO

A atividade de extração mineral no Brasil tem grande importância social e econômica para o país. Segundo o IPEA, em 2010, essa atividade era responsável por 4,2% do PIB e por 20% das exportações brasileiras<sup>(1)</sup>. Em 2015, foram produzidas aproximadamente 400 milhões de toneladas de minério de ferro<sup>(2)</sup>.

Acompanhado da grande extração de minérios está a produção de resíduos de mineração, que no ano de 2005 atingiu o valor de 290 milhões de toneladas de rejeitos gerados. Constatou-se o ferro como o minério que mais contribuiu para essa quantidade de rejeito, com 35,08%<sup>(1)</sup>. Estima-se ainda que, no ano de 2030, a geração de rejeitos será de mais de 680 milhões de toneladas<sup>(1)</sup>.

Em função da quantidade produzida anualmente fica evidente a necessidade de buscar por novos destinos para os rejeitos de mineração. Uma possibilidade está relacionada ao reaproveitamento desse material em obras de pavimentação.

As obras de pavimentação requerem um elevado consumo de materiais naturais, principalmente solos e materiais granulares e, conseqüentemente, de recursos financeiros. Utilizados em camadas de base, sub-base e/ou reforço de subleito, os rejeitos de mineração têm o potencial de reduzir o consumo de recursos naturais, promovendo o desenvolvimento sustentável. Além disso, a destinação dos rejeitos de mineração como material de construção reduz a disposição desse material em barragens, diminuindo os impactos ambientais gerados pela atividade, aumentando a segurança tanto para a população, quanto para as empresas mineradoras.

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes, o Brasil é um país rodoviarista, pois mais de 61% das cargas e 95% dos passageiros são transportados pelo modo rodoviário. Em 2017, a extensão da malha rodoviária brasileira era de 1.735.621 km, dos quais apenas 12,3% (212.886 km) estavam pavimentadas. Isso implica numa densidade da malha rodoviária pavimentada total muito pequena, de 25,0 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km<sup>2</sup> de área. Comparativamente, os EUA e a China, possuem 437,8 km e 421,6 km de rodovias pavimentadas para cada 1000 km<sup>2</sup><sup>(3)</sup>.

Não obstante, os pavimentos brasileiros se encontram em um péssimo estado de conservação e utilização. A maior parte (77%) da malha viária foi pavimentada nas décadas de 1970 (37,2%), 1980 (28,1%) e 1990 (11,7%), sendo que a maioria (96,4%) é composta por revestimento asfáltico na sua camada superficial (pavimentos flexíveis), e apenas 3,6% (7.650 km) da extensão total da malha viária pavimentada é constituída por pavimentos rígidos, construídos nas últimas décadas<sup>(3)</sup>.



Geralmente, o pavimento flexível é projetado para atender o tráfego durante uma vida útil de 10 anos, enquanto no projeto do pavimento rígido a vida útil considerada varia de 20 a 30 anos. Em função disso, todos os pavimentos que foram construídos nas décadas de 1970 a 2000 já deveriam ter sido reconstruídos – ou, pelo menos, reforçados –, mas nem todas as estruturas receberam os cuidados necessários. Isso se reflete na baixa qualidade dos pavimentos e, conseqüentemente, nos valores gastos anualmente com serviços de manutenção, que consomem mais da metade dos investimentos disponibilizados para o setor de infraestrutura rodoviária.

A incorporação de rejeitos de minério de ferro, nas camadas dos pavimentos pode também auxiliar no cenário descrito anteriormente, através da redução da utilização dos recursos naturais, e, possivelmente, da redução do custo de construção dos pavimentos.

Essa pesquisa tem como objetivo avaliar a incorporação de rejeitos de mineração da dragagem da UH Risoleta Neves em misturas estabilizadas de solo-cimento para camadas de base, sub-base e/ou reforço de subleito. Dessa maneira, busca-se reduzir o consumo de recursos naturais para as obras de pavimentação. O objetivo da pesquisa é estudar o comportamento de misturas de solo-cimento com adições de diferentes percentuais de rejeitos (sedimentos de dragagem), e verificar, através de ensaio mecânico, se as misturas atendem ao limite mínimo de resistência à compressão estipulado por norma para serem empregadas nas camadas dos pavimentos.

## 2. REJEITOS DE MINERAÇÃO

Na atividade de mineração, a quantidade de resíduos gerada varia de acordo com o processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície<sup>(1)</sup>. Vale destacar que, na geração de resíduos de mineração, existem os resíduos sólidos de extração (estéreis) e os resíduos gerados do processo de tratamento/beneficiamento (rejeitos)<sup>(2)</sup>. Os estéreis são produzidos a partir das atividades de escavação (lavra) e compõem, aproximadamente, 75% dos resíduos de mineração. Eles não possuem valor econômico e são dispostos, geralmente, em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes do processo de beneficiamento do minério e compõem, aproximadamente, 25% dos resíduos de mineração<sup>(1)</sup>. O transporte e deposição dos rejeitos é mais complexo por envolver uma grande quantidade de água. O método de disposição mais comumente usado é a partir de reservatórios criados por diques de contenção ou barragens<sup>(2)</sup>.



Os rejeitos podem ser classificados quanto a sua granulometria. Os rejeitos de granulometria fina são denominados lama, e rejeitos de granulometria grossa (acima de 0,075 mm) são denominados rejeitos granulares<sup>(2)</sup>.

Dentre os rejeitos de mineração, o rejeito relacionado ao minério de ferro encontra-se com a pesquisa em estágio mais avançado. Tal fato está relacionado com a grande participação desse mineral na economia brasileira e com a elevada quantidade extraída anualmente. Em 2007, o valor da produção de minério de ferro atingiu 19,2 bilhões de reais, representando 50% do valor da produção mineral brasileira. Em 2005, o minério de ferro era responsável por cerca de 32,95% dos rejeitos de mineração gerados no Brasil, com a expectativa de ultrapassar os 40% nos anos seguintes<sup>(2)</sup>.

A utilização de rejeito de minério de ferro em pavimentos pode ser realizada de diferentes formas<sup>(4)(5)(6)</sup>:

- Misturas de solo e rejeito;
- Misturas estabilizadas quimicamente (rejeito + cimento ou rejeito + cal);
- Misturas estabilizadas granulometricamente (agregados + rejeito);
- Concreto (concreto + rejeito);
- Piso intertravado (blocos de rejeito + cimento);
- Misturas Asfálticas (rejeito + asfalto).

No Brasil, as diversas pesquisas realizadas empregando o rejeito de minério de ferro em materiais para pavimentação têm apresentado resultados promissores. No entanto, as misturas realizadas geralmente são compostas por dois materiais como rejeito e solo ou rejeito e cimento.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Os materiais empregados na pesquisa são: solo, cimento e rejeito de minério de ferro.

O solo utilizado é proveniente da jazida de Begot, localizada no município de Marituba, no estado do Pará<sup>(7)</sup>. O solo pertence a camada compreendida entre as profundidades de 1,00 m e 1,50 m.

O cimento utilizado pertence à classe CP-II, da marca Votorantim.

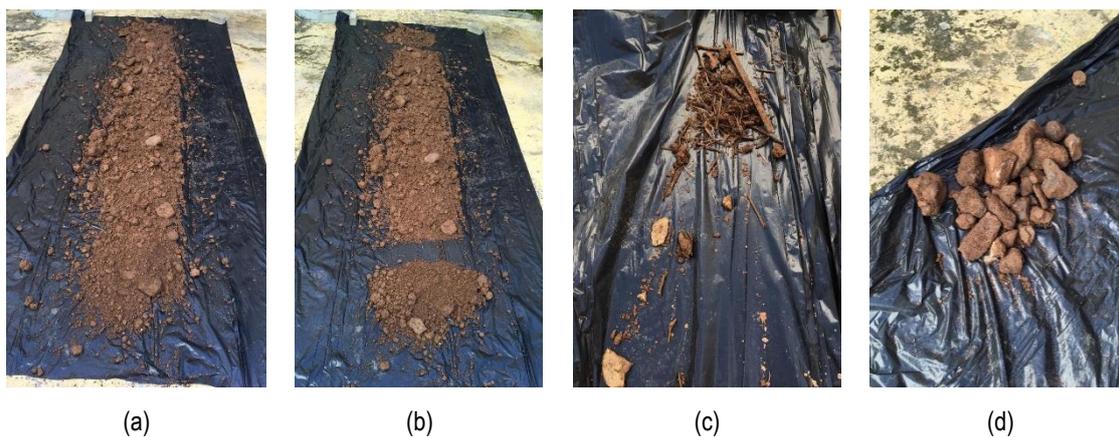
O rejeito de minério de ferro foi obtido da dragagem da UHE Risoleta Neves. A Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (conhecida por Candonga), instalada no rio Doce, no limite entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, no estado de Minas Gerais, foi a segunda hidrelétrica a ser



atingida pela inundação de lama de rejeitos de minério da mineradora Samarco Mineração S.A. um dia após o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana, em 2015. A barragem funcionou como um bloqueio da lama que seguiu um percurso de 77 km desde a barragem de Fundão. O reservatório tornou-se drasticamente tomado pela lama, com um acúmulo de rejeitos de minério de, pelo menos, 10 milhões de metros cúbicos de material sólido na barragem. Após determinação do IBAMA para realização da retirada do material acumulado, a mineradora tem feito a dragagem da lama acumulada (sedimento) do reservatório para mitigar os danos ambientais causados na região do reservatório e para evitar um possível rompimento desta barragem<sup>(8)</sup>.

O rejeito foi submetido a um processo de preparo antes de sua aplicação nas misturas de solo-cimento. Todo o material recebido para a pesquisa ( $m = 150 \text{ kg}$ ) foi despejado em linha reta sobre uma lona plástica, de um sentido ao outro, entre as extremidades da lona até a colocação de todo o lote formando uma pilha (Figura 1a). As duas extremidades da pilha foram separadas (Figura 1b), inseridas em baldes e despejadas acima da pilha formada, por todo o seu comprimento. Durante o procedimento de homogeneização do material, descrito anteriormente, também foram realizadas as retiradas de impurezas (Figura 1c), tais como, raízes e plásticos, e de rochas de grandes dimensões (Figura 1d), que foram descartadas. Por fim, o material homogeneizado foi inserido em sacos plásticos, que foram vedados. A Figura 1 ilustra as etapas de preparo do rejeito.

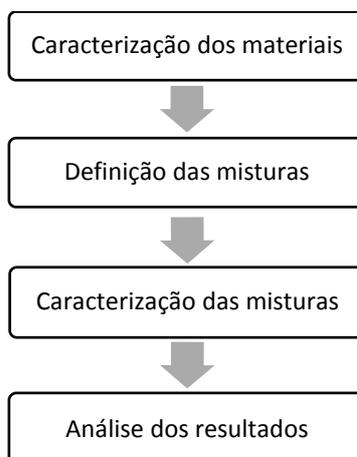
Figura 1: Preparo do rejeito: (a) Material empilhado; (b) Corte das frações nas extremidades; (c) Parte das impurezas retiradas; (d) Parte das rochas grandes retiradas.



Para avaliar o comportamento das misturas de solo-cimento com o sedimento de dragagem foi elaborado um planejamento experimental, composto por 4 etapas, que são apresentadas no fluxograma da Figura 2.



Figura 2: Planejamento experimental.



### 3.1. Caracterização dos Materiais

A primeira etapa consistiu da caracterização dos materiais através dos seguintes ensaios: granulometria, massa específica e composição química.

Os resultados da caracterização do solo são apresentados na Tabela 1<sup>(7)</sup>, onde pode-se verificar que os valores de IP e LL estão acima dos limites da especificação ( $IP \leq 6\%$  e  $LL \leq 25\%$ ) para emprego como material para camada de pavimento, não sendo recomendado o uso do material puro. Além disso, apesar de apresentar valor de CBR alto (42,80%), também não atende ao limite mínimo exigido para camada de base ( $CBR \geq 60\%$ ).

Tabela 1: Resultados de caracterização do solo.

Parâmetro	Valor	Norma
Massa Específica Aparente Seca ( $g/cm^3$ )	2,01	DNIT 172/2016-ME <sup>(9)</sup>
Umidade Ótima (%)	9,80	DNIT 172/2016-ME <sup>(9)</sup>
CBR (%)	42,80	DNIT 172/2016-ME <sup>(9)</sup>
Expansão (%)	0,28	DNIT 172/2016-ME <sup>(9)</sup>
Índice de plasticidade, IP (%)	13,3	DNER-ME 082/1994 <sup>(10)</sup>
Limite de liquidez, LP (%)	25,3	DNER-ME 122/1994 <sup>(11)</sup>
Classificação MCT	LA'	DNER-CLA 259/1996 <sup>(12)</sup>
Classificação HRB	A-2-6	<sup>(13)</sup>

O rejeito e o solo tiveram suas composições granulométricas determinadas de acordo com as prescrições da norma NBR 7181<sup>(14)</sup>. Os ensaios do rejeito foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, da POLI/UFRJ, através de peneiramento mecânico. As informações sobre o ensaio do solo são detalhadas em SOUSA (2017)<sup>(7)</sup>. Para as análises granulométricas do rejeito foi



necessária a secagem de aproximadamente 3 kg do material, a partir da exposição ao sol e ao ambiente externo por 72 h. A massa seca do material foi separada em 3 amostras, as quais foram submetidas separadamente ao peneiramento mecânico por 6 minutos. A partir do resultado de cada amostra, foi obtida a média aritmética da massa retida em cada peneira e determinada a composição granulométrica (Tabela 2). O resultado apresentado identificou elevadas porcentagens de pedregulhos e areia grossa (Tabela 3).

Tabela 2: Granulometria do rejeito e do solo.

Peneira Abertura (mm)	Rejeito	Solo
	% Passante	% Passante
25,00	100,00%	100,00%
19,00	96,09%	
9,50	78,41%	99,29%
4,75	56,05%	97,54%
2,00	31,68%	94,21%
0,85	17,26%	
0,60	14,88%	
0,42	12,16%	87,52%
0,30	10,04%	
0,15	5,55%	
0,075	2,18%	36,30%

Tabela 3: Composição granulométrica do rejeito e do solo.

Material	Rejeito	Solo
Pedregulho	68,32%	2,46%
Areia Grossa	16,80%	6,69%
Areia Média	6,38%	58,82%
Areia Fina	6,50%	
Silte		9,07%
Argila	2,00%	22,96%
Total	100,00%	100,00%

Os ensaios de massa específica do sedimento de dragagem e do cimento foram realizados em um Picnômetro a Gás AccuPyc 1340 (Micromeritics), nas dependências do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Os ensaios de superfície específica do sedimento de dragagem e do cimento foram feitos de acordo com a norma NBR 16372<sup>(15)</sup>, nas dependências do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. A amostra de sedimento de dragagem sofreu o processo de moagem e foi previamente seca em estufa por 72 h antes dos ensaios, a uma temperatura de aproximadamente 105°C. Os resultados são



apresentados na Tabela 4, com valores individuais de massa específica e resultados médios de três ensaios por material para a superfície específica.

Tabela 4: Massas específicas e superfícies específicas do cimento e do sedimento de dragagem.

	Cimento CP-II	Sedimento de dragagem
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,9697	2,8010
Superfície Específica (cm <sup>2</sup> /g)	5200	1640

As composições químicas do sedimento de dragagem e do cimento foram determinadas a partir de análises semi-quantitativas realizadas por espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X em equipamento Shimadzu (Modelo EDX 800), do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. No ensaio, a amostra é atingida por raios X, e, quando isso ocorre, elétrons das camadas mais internas são ejetados para camadas mais internas. Ao retornar para suas camadas originais, os elétrons emitem energias características para cada elemento. Todas as etapas do ensaio foram realizadas nas dependências do NUMATS e do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Composições químicas do cimento e do sedimento de dragagem.

Composto Químico	Composição (%)	
	Cimento CP-II	Sedimento de dragagem
CaO	63,17	0,63
SiO <sub>2</sub>	19,13	53,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,25	-
SO <sub>3</sub>	3,96	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,82	41,81
K <sub>2</sub> O	0,56	1,64
TiO <sub>2</sub>	0,48	1,53
MnO	0,39	0,29
SrO	0,25	-
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,41
ZrO <sub>2</sub>	-	0,07
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,06
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,04



### 3.2. Definição das Misturas

Foram escolhidas 3 misturas diferentes para serem estudadas: uma mistura de referência, contendo apenas solo e cimento, uma mistura com 10% de sedimentos de dragagem e uma mistura com 20% de sedimentos de dragagem.

Inicialmente foi realizada a dosagem do teor de cimento empregando o método da Associação Brasileira de Cimento Portland, em função das características do solo (NBR 12253)<sup>(16)</sup>. O teor de cimento provável foi de 7%. Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na umidade ótima e com o teor provável de cimento igual a 7%. Após 7 dias de cura úmida, foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples nos dois cilindros. Como os resultados obtidos (média de 0,6 MPa) foram inferiores ao limite mínimo de 2,1 MPa (NBR 12253)<sup>(16)</sup>, a norma recomenda que seja adotado o valor provável de mais 2% de cimento. No entanto, adotou-se o valor de 10% de cimento, por ser o valor já utilizado em outras pesquisas e, a partir disso, foram definidas as misturas de solo-cimento com rejeito. A Tabela 6 apresenta as denominações e as composições das misturas.

Tabela 6: Composição das misturas estudadas.

Nomenclatura	% Cimento	% Sedimentos de Dragagem
C10SD00	10%	0%
C10SD10	10%	10%
C10SD20	10%	20%

### 3.3. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova e Preparo das Superfícies

As dimensões escolhidas dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de compressão uniaxial nas misturas de solo-cimento foram de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O preparo das misturas e a moldagem foram feitos na seguinte ordem:

- Medições das massas dos materiais necessárias para dois moldes cilíndricos por mistura;
- Adição do cimento, solo e rejeito, nessa respectiva ordem, na cuba da argamassadeira com capacidade de 20 litros (Figura 3a e Figura 3b);
- Homogeneização dos materiais em argamassadeira por 1 minuto;
- Interrupção da mistura para a raspagem do material aderido à superfície da cuba;
- Homogeneização dos materiais em argamassadeira por mais 1 minuto, enquanto foi adicionada a água (Figura 3c);
- Pesagem dos moldes;



- Adição da mistura aos moldes em 3 camadas, onde o material de cada camada foi compactado utilizando a energia intermediária do ensaio de Proctor;
- Retirada de uma amostra de cada corpo de prova para a obtenção da umidade da mistura;
- Pesagem de cada molde + corpo de prova;
- Colocação dos moldes preenchidos em um armário de cura envolvidos por um cobertor encharcado com água para a cura (Figura 3d);
- Desmoldagem dos corpos de prova após um período de cura de 24 horas;
- Selagem dos corpos de prova com filme plástico (Figura 3e);
- Colocação dos corpos de prova selados em câmara úmida, onde permaneceram por 6 dias, concluindo um período total de cura de 7 dias.

Devido à falta de colarinho no molde de adotado, observou-se que a última camada de cada corpo de prova não foi compactada de maneira adequada durante a moldagem. A solução para o problema citado foi a realização do corte manual com uma serra metálica de 0,5 cm do topo de cada corpo de prova após o período total de cura. Os corpos de prova cilíndrico possuíram, portanto, 19,5 cm de altura. A fim de garantir o paralelismo entre as superfícies de topo e base e sua uniformidade, os corpos de prova foram submetidos, após a cura e antes dos ensaios de compressão, ao capeamento com enxofre e cinza volante.

Figura 3: Preparo e moldagem das misturas: (a) Argamassadeira; (b) Colocação dos materiais granulares na cuba; (c) Realização da mistura após a inserção da água; (d) Corpos de prova moldados no armário de cura; (e) Corpos de prova selados com filme plástico.



### 3.4. Procedimentos de Ensaios das Misturas

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial seguiram os procedimentos da norma NBR 12025<sup>(17)</sup> e foram realizados em uma prensa de ensaios Shimadzu UH-F 1000 kN com capacidade de 100 toneladas (Figura 4a), com a velocidade de deslocamento da mesa igual a 0,1



mm/min. Os deslocamentos axiais foram medidos por dois transdutores elétricos fixados na zona central do corpo de prova (Figura 4b). O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos pertencente ao Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. A partir da aquisição dos dados de força e deslocamentos axiais foi possível a determinação da curva tensão *versus* deformação axial de cada corpo de prova. Com a curva tensão *versus* deformação de cada corpo de prova foi determinado o módulo de elasticidade secante, a partir da Equação A.

$$E = \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \right) \quad (A)$$

onde: E = Módulo de elasticidade (GPa);

$\sigma_2$  = Tensão correspondente a 40% da tensão máxima (MPa);

$\sigma_1$  = Tensão correspondente à deformação  $\varepsilon_{a1}$  (MPa);

$\varepsilon_{a2}$  = Deformação axial correspondente à tensão  $\sigma_2$  (mm/mm);

$\varepsilon_{a1}$  = Deformação axial igual a  $5 \times 10^{-5}$  (mm/mm).

Figura 4: Ensaio de compressão uniaxial: (a) Prensa Shimadzu; (b) Corpo de prova com transdutores elétricos.



(a)



(b)

A umidade do corpo de prova foi obtida empregando a Equação B<sup>(17)</sup>:

$$h = \frac{m_{bh} - m_{bs}}{m_{bs} - m_c} \times 100\% \quad (B)$$

onde: h = teor de umidade da amostra, em %;



$M_{bh}$  = massa do recipiente mais amostra úmida, em g;

$M_{bs}$  = massa do recipiente mais amostra úmida da amostra seca, em g;

$M_c$  = massa do recipiente, em g.

A massa específica aparente seca do corpo de prova,  $\gamma_s$ , foi obtida empregando a Equação C(17):

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{h+100} \times 100, \text{ em kg/m}^3 \text{ ou g/cm}^3 \quad (C)$$

onde:  $\gamma$  = massa específica aparente do corpo de prova;

$$\gamma_s = \frac{M_h}{V}, \text{ em kg/m}^3 \text{ ou g/cm}^3;$$

$M_h$  = massa do corpo de prova igual à massa do conjunto molde mais corpo de prova úmido menos a massa do molde, em kg ou g;

$V$  = volume do corpo de prova compactado (volume do molde), em  $m^3$  ou  $cm^3$ .

### 3.5. Resultados e Análise de Resultados

A Figura 5 apresenta as curvas tensão *versus* deformação dos corpos de prova da mistura de referência C10SD00A, sem o rejeito em sua composição. A Figura 6a e a Figura 6b mostram as curvas tensão *versus* deformação dos corpos de prova das misturas com rejeito em suas composições C10SD10 e C10SD20, respectivamente. A Tabela 7 apresenta os resultados das propriedades mecânicas de resistência à compressão uniaxial e Tabela 8 apresenta os resultados de umidade e massa específica aparente seca.

Figura 5: Ensaio de compressão uniaxial: Curvas tensão-deformação da mistura C10SD00.

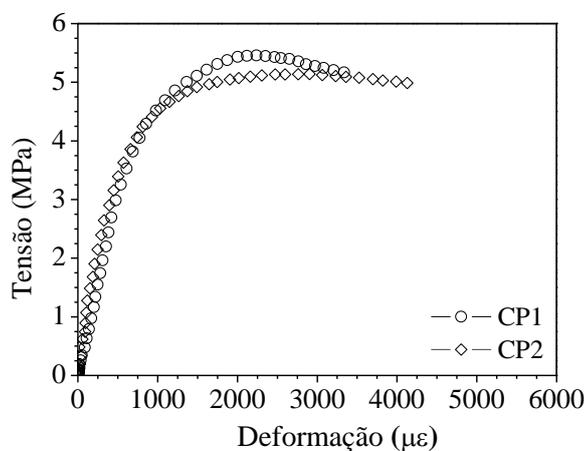




Figura 6: Ensaio de compressão uniaxial: (a) Curvas tensão-deformação da mistura C10SD10; (b) Curvas tensão-deformação da mistura C10SD20.

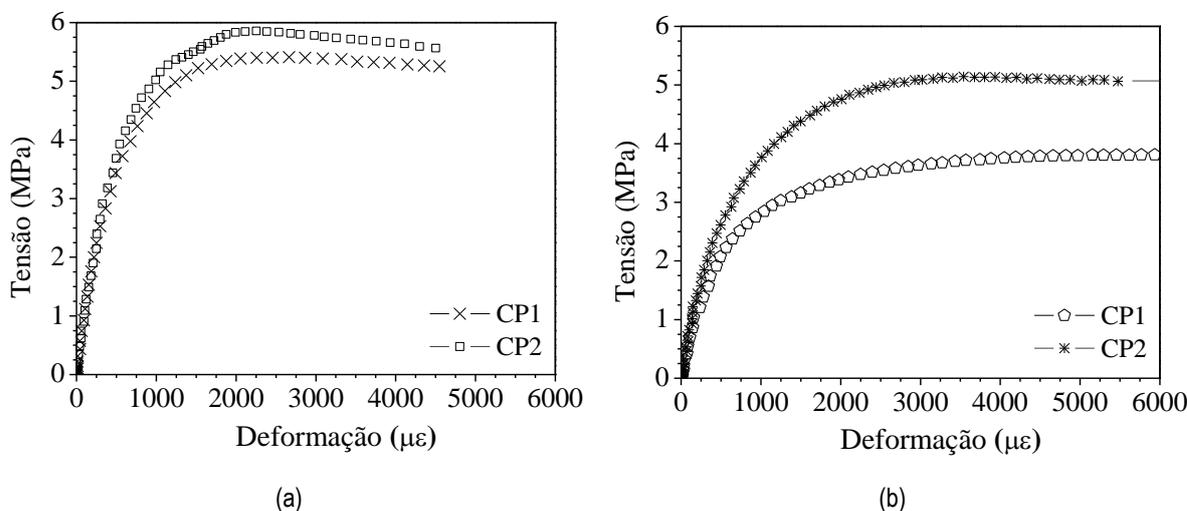


Tabela 7: Propriedades mecânicas de compressão simples.

Amostra	Resistência à Compressão de Ruptura (MPa)	Deformação Axial de Ruptura ( $\mu\epsilon$ )	Módulo de Elasticidade (GPa)
C10SD00	5,31	2461	7,5
C10SD10	5,65	2224	9,1
C10SD20	4,48	4711	5,7

Tabela 8: Resultados de umidade e massa específica aparente seca.

Amostra	Umidade (%)	Massa específica aparente seca ( $g/cm^3$ )
C10SD00	10,18	2,241
C10SD10	8,89	2,313
C10SD20	9,58	2,286

A partir dos resultados apresentados na Tabela 7 pode-se verificar que todas as misturas apresentaram resistência à compressão simples acima do valor mínimo de 2,1 MPa recomendado pela norma NBR 12253<sup>(16)</sup> para misturas de solo-cimento para camadas de base de pavimentos.

## 4. CONCLUSÕES

A quantidade de rejeito de mineração, particularmente de minério de ferro, gerada anualmente no Brasil faz com que seja necessária a busca por alternativas para utilização do rejeito. Atualmente já existem pesquisas sobre o uso desses materiais em diversas aplicações, como na pavimentação.

O consumo de materiais naturais (solos e agregados) nas camadas de pavimentos é alto, chegando a 9800 toneladas/km. Muitas vezes, os materiais disponíveis nas regiões da execução da obra não atendem as especificações, não sendo recomendado o emprego do material puro em camadas do



pavimento. Para servir como alternativa é necessária a estabilização com aditivos que possam aumentar sua resistência e melhorar as suas propriedades para ser empregado como material para pavimentação.

Os resultados da adição de rejeito de mineração nas misturas de solo-cimento mostraram que essa pode ser uma excelente alternativa como material para pavimentação, uma vez que as misturas com adição de 10% e 20% de sedimentos de dragagem apresentaram resistência à compressão simples bem acima do mínimo exigido pela especificação (de 2,1 até 2,7 vezes), sendo que a mistura com 10% de rejeito teve um aumento de 6,33% na resistência a compressão simples em comparação com a mistura de referência, mostrando que o rejeito pode ser considerado um bom aditivo para o solo. Tal fato pode estar relacionado a nova granulometria da mistura e, conseqüentemente, melhor compactação do material.

Além disso, o uso de rejeitos de mineração em camadas de pavimento também contribui para dar um novo destino aos resíduos gerados pela mineração, reduzindo o problema ambiental, além, de, possivelmente, reduzir os custos relacionados às obras de pavimentação.

## 5. REFERÊNCIAS

1. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral**. 2016.
2. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. 2012.
3. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Estudo da Viabilidade Técnica de Utilização de Rejeitos de Minério de Ferro em Pavimentos Rodoviários**. 2018.
4. GALHARDO, D. C. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários**. 2015. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
5. BASTOS, L. A. de C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013. 97f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2013.
6. CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
7. SOUSA, J. G. M. de **Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação**. 2017. 122f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2017.
8. WIKIPÉDIA. **Usina Hidrelétrica Risoleta Neves**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina\\_Hidrel%C3%A9trica\\_Risoleta\\_Neves](https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_Risoleta_Neves). Acesso em 14/06/2019.
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 172/16: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2016.



10. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 082/94**: Determinação do limite de plasticidade. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.
11. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 122/94**: Determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994.
12. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259/96** - Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, RJ, 1996.
13. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. IPR. Publicação 719. 3ª ed., 274p. Rio de Janeiro, RJ, 2006.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2016.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar de cimento Portland. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2012.



# AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA PARA SELEÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS PARTICULADOS

**Letícia Missiatto Gavioli <sup>(1)</sup>; Cristiane Bueno <sup>(2)</sup>; João Adriano Rossignolo <sup>(3)</sup>**

(1) Universidade de São Paulo – leticiamissiattogavioli@gmail.com; (2) Universidade Federal de São Carlos – bueno.cristiane@gmail.com; (3) Universidade de São Paulo – j.a.rossignolo@gmail.com

**“SUBMISSÃO PARA AMBIENTE CONSTRUÍDO”**

## RESUMO

Nas últimas décadas, a produção de painéis de partículas expandiu devido à necessidade de otimização do uso da madeira e à maior demanda na indústria moveleira. As principais matérias-primas para fabricação de painéis de partículas são madeiras de pinus e eucalipto. Como alternativa, estudos utilizam como matérias-primas resíduos lignocelulósicos da agroindústria, motivados pela grande disponibilidade, baixo custo e apelo ambiental. Pesquisas sobre painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BCA) apresentam requisitos físicos e mecânicos que atendem normas brasileiras e internacionais para função não estrutural e uso interno em condições secas. Além disso, ao reduzir a demanda por extração de madeira virgem, o uso de BCA pode provocar variações nos impactos ambientais do ciclo de vida de produto, quando comparado à madeira. Dessa forma, esse estudo apresenta um panorama atual dos estudos realizados sobre a produção de painéis de partículas com três matérias-primas: eucalipto, pinus e BCA e seus potenciais de impactos ambientais. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é apresentada como estratégia ambiental para escolhas de matérias-primas em consonância com a economia circular, em sistemas e processos. Foi realizada uma abrangente revisão de literatura, nas bases de dados “Web of Science” e “Scopus”, e resultados indicam que os painéis de BCA apresentam menores impactos ambientais quando comparado ao eucalipto e pinus.

**Palavras-chave:** bagaço de cana-de-açúcar, ACV, MDP.



## LIFE CYCLE ASSESSMENT AS A STRATEGY FOR THE SELECTION OF RAW MATERIALS IN THE PARTICLEBOARD PRODUCTION

### ABSTRACT

In the last decades, the production of particle board has expanded due to the need to optimize the use of wood and the greater demand in the furniture industry. The main raw materials for the manufacture of particle board are pine and eucalyptus wood. As an alternative, studies use as raw materials lignocellulosic residues from agroindustry, motivated by high availability, low cost and environmental appeal. Research on particle board of sugarcane bagasse (SB) presents physical and mechanical requirements that meet Brazilian and international standards for non-structural function and internal use in dry conditions. In addition, by reducing the demand for virgin wood extraction, the use of SB can lead to variations in the environmental impacts of the product life cycle when compared to wood. Thus, this study presents a current panorama of the studies carried out on the production of particle panels with three raw materials: eucalyptus, pinus and SB and their environmental impact potentials. The Life Cycle Assessment (LCA) is presented as an environmental strategy for raw material choices in line with circular economy in systems and processes. A comprehensive literature review was conducted on the Web of Science and Scopus databases and results indicate that SB panels have lower environmental impacts when compared to eucalyptus and pinus.

**Key-words:** sugarcane bagasse, LCA, MDP.



## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil foi o 8º maior produtor mundial de painéis de madeira reconstituída do mundo em 2016<sup>(1)</sup>, com produtividade de 7,3 milhões de metros cúbicos, sendo 3 milhões referentes ao MDP (*medium density particleboard*). As principais matérias-primas dos painéis MDP correspondem ao setor brasileiro de árvores plantadas, que em 2016 representou 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, onde 5,7 milhões são de eucalipto e 1,6 milhão é de pinus<sup>(1)</sup>.

Entretanto, devido à pressão sobre as florestas de crescimento lento, estudos estão sendo realizados buscando avaliar novas matérias-primas ambientalmente corretas para a fabricação de painéis, como resíduos agroindustriais, que têm apresentado notável potencial como matéria-prima para painéis particulados, visto que a composição química destes resíduos é similar à da madeira<sup>(2)</sup>.

Pesquisas estão sendo realizadas sobre o uso de resíduos agroindustriais para a produção de painéis particulados alternativos, principalmente com a utilização do bagaço de cana-de-açúcar<sup>(3,4,2,5)</sup>, nas quais o produto apresentou propriedades físicas e mecânicas atendendo a norma brasileira NBR 14810<sup>(6)</sup>, a norma americana ANSI A.208.1<sup>(7)</sup> e europeia EN 312<sup>(8)</sup> para painéis de partículas, garantindo sua utilização para os mesmos fins que os painéis convencionais.

Mas antes de esses produtos serem chamados de “sustentáveis” é essencial entender todas as consequências envolvidas e os reais ganhos para o meio ambiente e para o setor em questão<sup>(9)</sup>. Uma maneira de quantificar consistentemente o aspecto ambiental para avaliar ou comparar um ou mais sistema de produto ou serviço é aplicar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A ACV é uma técnica de gestão ambiental baseada em normas ISO (International Organization for Standardization), NBR ISO 14040<sup>(10)</sup> e NBR ISO 14044<sup>(11)</sup>, porém estudos sobre ACV aplicada a painéis de partículas são escassos. De acordo com pesquisas nas bases de dados Scopus (de e Web of Science, de 2004 até Maio de 2019, foram publicados uma média de 30 artigos, relacionando as palavras-chave “LCA” (*Life Cycle Assessment*) e “particleboard”.

Pesquisadores aplicaram a ACV comparativa entre um painel de partículas de aparas de pinus e outro de partículas de bagaço de cana-de-açúcar<sup>(9)</sup>. Os resultados indicaram que o painel de BCA apresentou menores impactos ambientais potenciais.

Ainda assim, foram estudados os impactos ambientais da produção de painéis de partículas utilizando BCA e uma das categorias de impacto ambiental que se mostrou mais expressiva



referente a produção do bagaço foi a de eutrofização<sup>(12)</sup>, devido a quantidade de fertilizantes aplicados na fase agrícola da cana-de-açúcar.

Dessa forma, este estudo busca, por meio de revisão de literatura, comparar os impactos ambientais potenciais apresentados por estudos de ACV de BCA como matéria-prima alternativa em relação às matérias-primas convencionais, pinus e eucalipto, para produção de painéis de partículas, a fim de atuar como uma estratégia ambiental na escolha de matérias-primas.



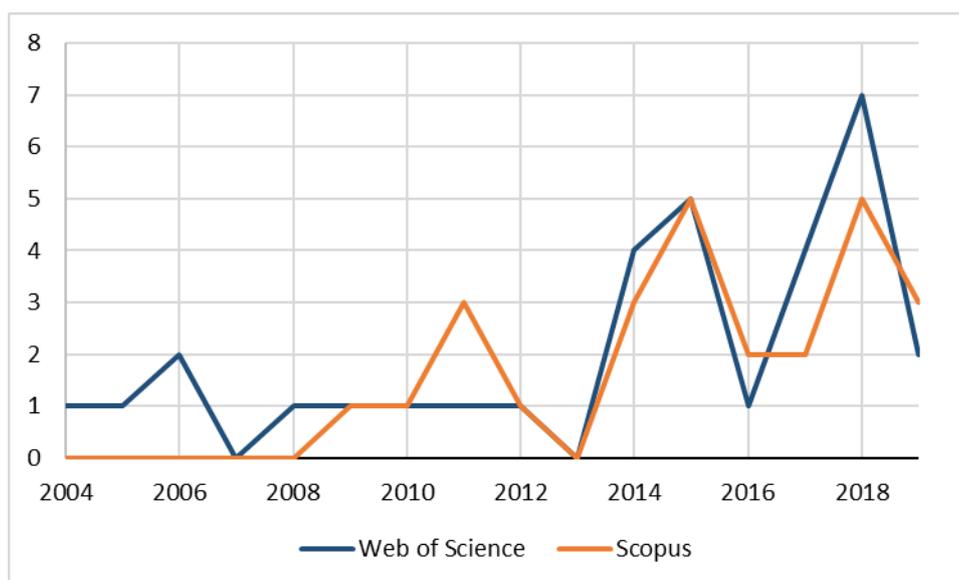
## 2. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi desenvolvida em três etapas: 1) Mapeamento de estudos existentes de ACV aplicado em painéis de partículas; 2) Seleção de estudos referentes às matérias-primas estudadas (BCA, pinus e eucalipto); 3) Identificação das categorias de impacto mais expressivas para cada matéria-prima e discussão das mesmas.

### 2.1 Mapeamento de estudos existentes

Com o intuito de mapear os estudos existentes sobre a aplicação da ACV em painéis de partículas, foram realizadas buscas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* vinculando as palavras-chaves “LCA” (*Life Cycle Assessment*) e “*particleboard*”. A Figura 1 apresenta os resultados encontrados.

Figura 1 – Quantidade de estudos encontrados nas bases de dados.



As pesquisas realizadas nas bases de dados *Scopus* (de 2009 até maio de 2019) e *Web of Science* (de 2004 até maio de 2019), apresentam um total de 29 e 32 artigos publicados, respectivamente. Apesar do crescimento no número de estudos a partir de 2014, o número é considerado pequeno se comparado às pesquisas que vinculam as palavras “*particleboard*” e “*pinus*” ou “*eucalyptus*”.

O estudo da técnica de ACV é recente, as publicações nas bases de dados apresentadas datam de 15 anos atrás e o mapeamento de pesquisas existentes pode divulgar o panorama atual do tema e



expor questões que ainda não foram totalmente solucionadas como oportunidades de novas pesquisa.

## **2.2 Seleção de estudos referentes às matérias-primas**

Dentre os artigos encontrados, foram feitas pesquisas nos próprios sites das bases de dados com outras palavras-chaves: “pinus”, “eucalyptus”, “wood”, “bagasse” e “sugarcane” para selecionar dentre o total, os artigos relacionados com cada matéria-prima. Além disso, foi realizada uma análise do título e resumo de cada artigo para verificar se os mesmo estavam em consonância com a proposta deste estudo.

A maioria dos estudos encontrados sobre painéis de partículas e ACV são relacionados a madeira ou comparação entre o uso de madeira e resíduos de madeira <sup>(13, 14, 15, 16, 17)</sup>, e em muitos não há especificação da espécie de madeira utilizada. Com as palavras-chaves “bagasse” e “sugarcane”, apenas um artigo foi encontrado<sup>(9)</sup>, dessa forma foi realizada uma busca separada com as palavras “LCA” e “sugarcane” e “bagasse”, onde somente mais um foi relacionado a produção de painéis de partículas<sup>(12)</sup>.

## **2.3 Identificação de principais Categorias de Impacto**

A partir da seleção de artigos publicados que vinculam ACV, painéis de partículas e as matérias-primas referentes ao presente estudo, foi realizada uma análise em cada um para identificação do software utilizado, metodologia de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e as Categorias de Impacto (CI) mais relevantes para cada material.

A discussão apresentada nesse artigo pretende analisar os impactos ambientais do pinus, eucalipto e BCA para a produção de painéis de partículas e difundir a ACV como uma estratégia ambiental na escolha de matérias-primas com menores impactos ambientais.

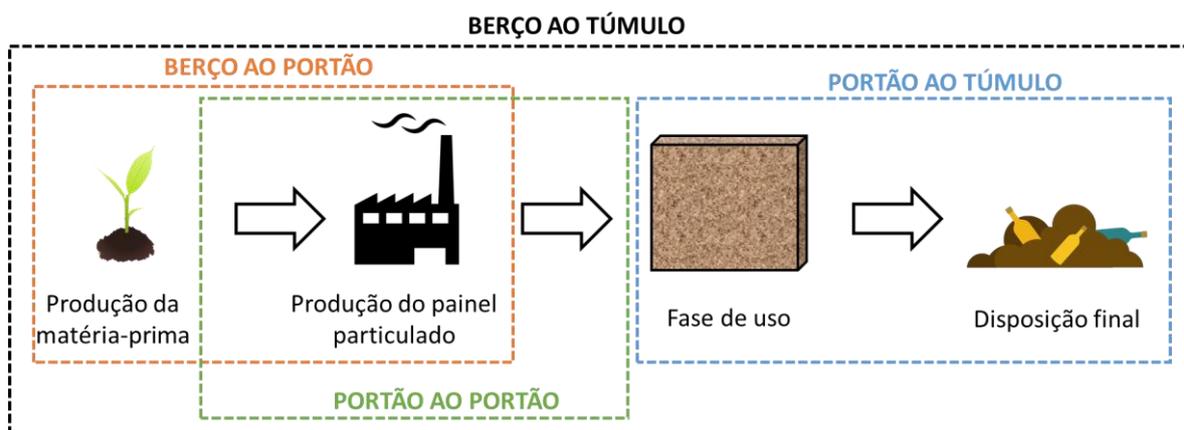


### 3. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma técnica de gestão ambiental dividida em quatro fases: definição de objetivo e escopo, inventário de ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados, os quais podem apresentar conclusões robustas e recomendações para melhorias<sup>(20)</sup>. O objetivo de uma ACV compreende as razões para a execução do estudo, a aplicação pretendida, o público-alvo e se os resultados serão divulgados publicamente<sup>(18)</sup>.

A ACV pode ser aplicada, de acordo com o objetivo proposto, com diversas abrangências, como do berço ao túmulo, que compreende toda a aquisição da matéria-prima, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem, sua disposição final e os respectivos transportes<sup>(19)</sup>. Como exemplo, a Figura 2, identifica as abrangências de uma ACV.

Figura 2 – Possíveis abrangências das fronteiras de uma ACV.



Na fase de ICV são quantificadas todas as entradas e saídas de cada processo para a manufatura de uma unidade funcional do produto e na fase de AICV, são definidas as categorias de impacto que serão utilizadas no estudo. Uma categoria de impacto é uma classe que representa as questões ambientais relevantes às quais pode-se associar os resultados da análise do inventário do ciclo de vida, e o indicador de impacto é uma representação quantificável de uma categoria<sup>(10)</sup>.



#### 4. PANORAMA ATUAL DA ACV EM PAINÉIS DE PARTÍCULAS

Os resultados de uma ACV podem indicar qual processo do sistema produtivo apresenta os maiores impactos ambientais potenciais ou nos casos de ACV comparativa, pode-se apontar qual produto ou serviço apresenta maiores influências ao meio ambiente. Segundo a NBR 14044<sup>(11)</sup>, a aplicação da ACV pode ainda identificar oportunidades de melhorias e subsidiar níveis de informações de tomadores de decisão na indústria.

A fabricação de gabinetes de escritório produzidos com painéis MDP de eucalipto foi analisada em uma indústria de médio porte para propor melhorias ambientais<sup>(16)</sup>. Os maiores impactos ambientais foram decorrentes da produção do painel MDP e do transporte do produto. Foi sugerido o estudo de outros cenários com combustíveis e insumos ambientalmente corretos para a produção de MDP, como por exemplo, o uso de resíduos.

No Japão, a ACV avaliou os impactos ambientais de painéis de partículas e painéis de fibras, como MDF (medium density fiberboard), HB (hard fiberboard) e IB (insulation fiberboard)<sup>(21)</sup>. Para os painéis de partículas e MDF, os principais impactos ambientais foram as emissões de formaldeído. Segundo os autores<sup>(21)</sup>, em outros lugares as regulamentações sobre essas emissões no estágio de uso não são tão rigorosas (como EUA e Europa) como no Japão, mas a tendência é a redução devido aos impactos na saúde humana.

A produção de painéis de partículas de eucalipto foi estudada também no Irã, no qual os maiores impactos ambientais foram devidos à produção da resina utilizada, ureia-formaldeído<sup>(22)</sup>, além da eletricidade e do transporte. Foram apresentadas recomendações de redução nas distâncias de transporte e otimização no consumo elétrico por maior eficiência nos motores e redução de horas paradas de trabalho.

A ACV foi utilizada para avaliar ambientalmente a produção de um guarda-roupas feito de painéis de média densidade no Brasil, estado de São Paulo. Nesse estudo<sup>(15)</sup>, foi feita uma análise do berço ao portão e os maiores impactos ambientais foram relacionados ao suprimento de matérias-primas e ao transporte para distribuição do produto. Os autores sugerem otimização no sistema de transporte e uso de matérias-primas alternativas, como o uso de madeira reciclada.

O uso da ACV para comparação entre dois produtos foi realizado no Brasil ao relacionar os impactos ambientais em todo o ciclo de dois diferentes painéis de partículas: MDP de aparas de



pinus e MDP de BCA<sup>(9)</sup>. O painel de pinus apresentou maiores impactos ambientais devido a distância de transporte das matérias-primas e ao uso da resina UF. Como sugestões para pesquisas futuras, novos adesivos vêm sendo estudados em escala piloto e uma ACV de painéis com diferentes resinas poderia analisar a que apresente menores impactos ao meio ambiente.

Em Hong Kong, um estudo recente aplicou a ACV para comparar alguns cenários de destinação de resíduos de madeira como matéria-prima alternativa para alguns processos<sup>(17)</sup>. Nos cenários onde houve comparação do uso do resíduo de madeira, o emprego dessa matéria-prima alternativa foi responsável por reduzir os impactos ambientais do sistema em que foi inserida.

Além de estudos com o painel de partículas, foi realizada ACV comparando painéis MDP convencionais e painéis de partículas ultraleves com a inserção de uma camada intermediária de espuma expandida baseada em ácido polilático<sup>(23)</sup>. Essa espuma reduziu a emissão de gases efeito estufa, porém ela também apresentou maiores valores de ecotoxicidade devido aos processos agrícolas envolvidos em sua produção.

Apesar de os estudos de ACV apresentarem conclusões gerais sobre quais os maiores impactos ambientais ou as melhores matérias-primas, dependendo da metodologia de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) utilizada, diferentes Categorias de Impacto (CI) são empregadas e uma análise individual destas pode apresentar oportunidades de melhorias mesmo nos melhores processos ou insumos.

#### **4.1 CI expressivas e hotspots em pinus, eucalipto e BCA**

No estudo de ACV do berço ao portão do guarda-roupas de painéis MDP, utilizou-se o método EDIP-97 para AICV<sup>(15)</sup>. Esse método possui 11 categorias de impacto e segundo o autor, foi desenvolvido baseado em modelos globais não desenvolvidos apenas para condições europeias. Nesse estudo<sup>(15)</sup>, após normalização, três categorias foram responsáveis por 68% de todos os impactos: toxicidade humana (TH), aquecimento global (AG) e acidificação (AC).

Para os outros estudos, não foi realizada normalização e as CIs mais expressivas foram citadas pelos autores por se destacarem em relação aos *hotspots*. Na Tabela 1 são apresentados os principais artigos utilizados na presente revisão bibliográfica. É importante ressaltar que os hotspots e as CIs mais impactantes variam de acordo com os materiais utilizados, processos de produção, fronteiras, transporte e fonte de energia, por exemplo, e esses fatores também se alteram de acordo com o país ou a região na qual é realizado o estudo.



Tabela 1 – Revisão de estudos de ACV em painéis de partículas.

Referência	Produto/ Unidade Funcional	Partículas	Sistema de produto	Método AICV	CI mais significativas	Hotspots
(21)	1 m <sup>3</sup> de painel de partículas	Madeira não definida	Berço ao portão	CML e USEtox	Toxicidade humana (TH)	Adesivo
(16)	1 gabinete de escritório com porta de correr	Eucalipto	Berço ao túmulo	ILCD 2011	Aquecimento global (AG)	Transporte e produção das matérias- primas
(22)	1 m <sup>3</sup> de painel de partículas	Eucalipto	Portão ao portão	CML-IA	Acidificação (AC), depleção da camada de ozônio (DCO), ecotoxicidade marinha (EM), oxidação fotoquímica (OF)	Resina UF, eletricidade e transporte
(15)	1 guarda- roupas feito com MDP	Madeira não definida	Berço ao portão	EDIP-97	Toxicidade humana (TH), aquecimento global (AG), acidificação (AC)	Suprimento de matérias- primas e distribuição de produto
(9)	1 m <sup>2</sup> de painel de partículas	Pinus e BCA	Berço ao túmulo	EDIP	Aquecimento global (AG), eutrofização (ET), acidificação (AC)	Transporte e adesivo
(23)	1 m <sup>3</sup> de painel de partículas	Madeira não definida	Berço ao portão	CLM2001	Aquecimento global (AG), ecotoxicidade (EC)	Matéria-prima



(17)	1 t de resíduo de madeira	Pinus e eucalipto	Berço ao portão	IMPACT 2002	Aquecimento global (AG)	Transporte e matéria-prima
(12)	1 m <sup>3</sup> de painel de partículas	BCA	Berço ao portão	CML e USEtox	Depleção abiótica (DA), ecotoxicidade (EC), eutrofização (ET), toxicidade humana (TH)	Óleo combustível pesado, eletricidade e resina UF

Em relação aos estudos que apresentam como produto o gabinete de escritório e o guarda-roupas, as comparações com os outros estudos não serão realizadas pois o processo produtivo envolve mais etapas do que a produção de um painel de partículas<sup>(15,16)</sup>. Ainda assim, as CIs mais relevantes para ambos os casos foram a toxicidade humana (TH), principalmente devido às emissões de formaldeído presente nos adesivos utilizados, aquecimento global (AG) e acidificação (AC) graças às emissões de gases de efeito estufa durante o transporte e a geração de eletricidade.

Considerando a CI de aquecimento global (AG), para a produção de 1m<sup>3</sup> de painel no Japão há a emissão de 440 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes<sup>(21)</sup>, no Irã o valor é em torno de 433 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes<sup>(22)</sup>. O estudo de Silva et al.<sup>(12)</sup> aponta o valor de 319 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes emitidos na produção de 1m<sup>3</sup> de painel de BCA e faz os cálculos de captura de carbono durante a fotossíntese pela cana-de-açúcar, alterando esse valor para - 364 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes. Os artigos que utilizaram madeira não estudaram a captura de carbono.

A produção de painel de partículas com uso do BCA manifestou maior impacto para a CI de eutrofização (ET), 75% relacionado à produção do BCA e 24% relacionado a produção do painel<sup>(12)</sup>. Nesse estudo<sup>(12)</sup>, os principais impactos referentes a produção do bagaço de cana-de-açúcar estão relacionados a aplicação de químicos, como fertilizantes nitrogenados e processos de colheita, como o diesel utilizado. Na fase de produção do painel, os impactos foram principalmente atribuídos à produção da resina ureia-formaldeído e à combustão de óleo combustível pesado na planta industrial.

No estudo comparativo entre 1 m<sup>2</sup> de painel particulado de pinus e BCA, a única CI em que o painel BCA apresentou maiores impactos foi no consumo de energia na fase de aquisição de matéria-prima devido ao maior uso de energia para secagem do BCA e na moenda para transformação da



cana-de-açúcar em BCA<sup>(9)</sup>. Para todas as outras CI, os impactos referentes à produção do painel de partículas de pinus foram superiores.

Como apresentado na Tabela 1, para todas as principais CIs evidenciadas nos estudos relacionados ao uso do ACV em painéis particulados, os maiores *hotspots* estão relacionados às matérias-primas utilizadas, à cadeia de transporte das mesmas até a planta industrial e ao uso de adesivos baseados em formaldeído. As principais categorias de impacto citadas foram aquecimento global (AG), toxicidade humana (TH) e ecotoxicidade (EC).



## 5. CONCLUSÕES

Os painéis com menores impactos ambientais foram os que utilizaram BCA e os painéis de pinus e eucalipto apresentaram maiores impactos relacionados ao transporte da madeira e ao uso de adesivos que apresentam formaldeído em sua composição. Sugestões incluíram melhorias no sistema de transporte, por distâncias menores e eficiência no trajeto ou por uso de combustíveis que apresentem menores emissões, como biodiesel. O uso de aparas, madeira reciclada ou resíduos para substituição da madeira virgem também foi apresentado como recomendação.

O painel de BCA apresentou maiores impactos ambientais para eutrofização e consumo de energia, evidenciando a necessidade de melhorias de processos, desde redução no uso de agroquímicos para a produção da cana-de-açúcar até maior eficiência no uso da energia elétrica.

Ambos os estudos apresentaram altos impactos ambientais relacionados ao uso de adesivos com base em formaldeído, destacando a necessidade de estudos comparativos com diferentes resinas para produção dos painéis, com o intuito de utilizar a ACV como estratégia na escolha de matérias-primas que sejam um passo a mais em direção a uma economia sustentável.



## 6. REFERÊNCIAS

1. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório anual 2017 ano base 2016**. Brasília: Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)
2. NAKANISHI, E. Y. et al. Study of the production process of 3-layer sugarcane-bamboo-based particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 618-625, 2018.
3. BARRERO, N. M. G. **Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil**. 229 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga, 2015.
4. MENDES, R. F. et al. Use of Sugarcane Bagasse for Particleboard Production. **Key Engineering Materials**, v. 634, p. 163–171, 2014.
5. OLIVEIRA, S. L. et al. Material Laminar inclusion. **Cerne**, v. 23, n. 2, p. 153–160, 2017.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, Rio de Janeiro. **NBR14810 – Painéis de partículas de média densidade. Parte 1: Terminologia**. Rio de Janeiro, 2013.
7. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**:. Gaithersburg, 1993.
8. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 312**. Bruxelas, 1993.
9. SANTOS, M. F. N. et al. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum spp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 345-355, 2014.
10. \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.
11. \_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044 – Gestão ambiental – Avaliação de ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.
12. SILVA, D. A. L. et al. Do wood-based panels made with agro-industrial residues provide environmentally benign alternatives? An LCA case study of sugarcane bagasse addition to particle board manufacturing. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 10, p. 1767–1778, 2014.
13. RIVELA, B. et al. Life cycle inventory of particleboard: a case study in the wood sector (8 pp). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 2, p. 106-113, 2006.
14. KIM, M. H., SONG, H. B. Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 199-207, 2014.
15. IRITANI, D. R. et al. Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 308-318, 2015.
16. MEDEIROS, D. L. et al. Life cycle assessment in the furniture industry: the case study of an office cabinet. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 11, p. 1823-1836, 2017.



17. HOSSAIN, M. U., POON, C. S. Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. **Journal of cleaner production**, v. 177, p. 387-397, 2018.
18. INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA – IBICT. **Manual do Sistema ILCD: Sistema Internacional de Referência de dados do ciclo de vida de produtos e processos**. Brasília, 2014.
19. TODD, J. A.; CURAN, M. A. **Streamline life-cycle assessment**: a final report from the SETAC north America streamline LCA workgroup. Environmental Toxicology. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) and SETAC Foundation for Environmental Education, 1999.
20. BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**. 266 p. Tese (Doutorado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
21. NAKANO, K. et al. Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 4, p. 957-969, 2018.
22. KOUCHAKI-PENCHAH, H. et al. Gate to gate life cycle assessment of flat pressed particleboard production in Islamic Republic of Iran. **Journal of cleaner production**, v. 112, p. 343-350, 2016.
23. GANNE-CHÉDEVILLE, C., DIEDERICHS, S. Potential environmental benefits of ultralight particleboards with biobased foam cores. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, 2015.



## DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA GRANDE VITÓRIA – ESPÍRITO SANTO

**Bruna Subtil Lima<sup>(1)</sup>; Karina de Oliveira Nascimento<sup>(2)</sup>; Saile  
Tomazelli<sup>(3)</sup>; Sayonara Maria de Moraes Pinheiro<sup>(4)</sup>**

(1) Universidade Federal do Espírito Santo – bsubtillima@gmail.com; (2) Universidade Federal do Espírito Santo – karinadeo.nascimento@gmail.com; (3) Universidade Federal do Espírito Santo – sailetomazelli@gmail.com; (4) Universidade Federal do Espírito Santo – sayonara.pinheiro@gmail.com

### RESUMO

A indústria da construção civil possui grande relevância na economia do país. Entretanto, o desenvolver de suas atividades acarreta impactos sobre o meio ambiente, como a geração de resíduos sólidos, do qual representa cerca de 40-70%. O Espírito Santo é relativamente novo no setor de gestão e reciclagem de resíduos da construção civil (RCD) se comparado ao cenário nacional, visto que as operações de usinas de RCD no estado tiveram início em 2012. Nesse contexto, este artigo busca avaliar os procedimentos relacionados à captação e destinação de RCD na Grande Vitória. Para isso, foram analisadas três usinas locais de reciclagem de RCD. Os resultados mostraram que apesar de possuírem capacidade para tratar aproximadamente 30% do RCD produzido na região, as usinas recebem menos de 13% desse material, advindos de pequenos geradores e grandes empresas privadas das áreas de construção, demolição, transporte e beneficiamento de rochas ornamentais, além disso, o agregado reciclado produzido é, usualmente, apenas empregado na pavimentação. Desta forma, ressalta-se a importância do desenvolvimento de pesquisas, normas técnicas, aumento da integração com as prefeituras locais e conscientização da população de forma a auxiliar os processos e garantir a correta destinação do RCD.

**Palavras-chave:** Resíduo de construção e demolição, reciclagem, Grande Vitória, agregado reciclado.

## DESTINATION OF CIVIL CONSTRUCTION WASTE IN GRANDE VITÓRIA - ESPÍRITO SANTO

### ABSTRACT

The construction industry has great relevance in the country's economy. However, the development of its activities has a great environmental impact, the generation of solid waste, of which represents about 40-70%. Espírito Santo is relatively new in the field of management and recycling of construction and demolition waste (CDW) compared to the national scenario, since the operations of CDW plants in the state began in 2012. In this context, this article aims to evaluate the procedures related to the collection and destination of construction waste in Grande Vitória. For that, three CDW recycling plants located in the study area were evaluated. The results showed that, despite having the capacity to treat approximately 30% of the CDW produced in the metropolitan region, the plants receive less than 13% of this material, coming from small generators and large private companies in the areas of construction, demolition, transportation and ornamental rock processing. Furthermore, the recycled aggregate is usually used in paving. Thus, it should be emphasized the importance of the development of research, technical standards and a greater integration with local governments and public awareness in order to facilitate the processes and ensure the correct destination of the CDW.

**Key-words:** Construction and demolition waste, recycling, Grande Vitória, recycled aggregate.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Importância do tema

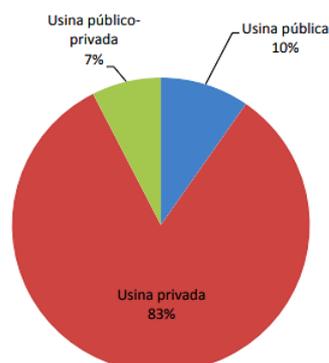
A construção civil atua como importante ferramenta na expansão e otimização das grandes metrópoles, polos industriais e logística de transporte, sendo assim, de primordial relevância para o crescimento econômico do país. Entretanto, apesar do desenvolvimento de temas relacionados à preservação do meio ambiente e a busca pelo aperfeiçoamento no planejamento de execução de obras, a indústria da construção civil continua sendo uma das grandes geradoras de resíduos nas cidades brasileiras, cerca de 40 a 70% de todo o resíduo sólido produzido (ABRECON, 2015).

A grande quantidade de resíduos gerados pelo desperdício nos canteiros de obras traz como consequência o aumento no consumo de materiais, assim como extração de matéria prima, energia, água e combustível. Além disso, seu mau gerenciamento pode acarretar o crescimento no número de áreas de transbordo clandestinos, propiciando a proliferação de vetores prejudiciais à saúde humana, comprometimento da capacidade de aterros adequados para deposição de materiais, acelerando o processo de esgotamento dos aterros, obstrução de córregos e assoreamento de rios devido ao carreamento de sedimentos.

No Brasil são coletados por dia 123.421 toneladas/dia de resíduos provenientes da construção e demolição, onde deste montante a região sudeste é responsável por 64.063 toneladas/dia (ABRELPE, 2018).

Nesse contexto, as usinas de reciclagem de resíduos da construção civil interveem de forma a atenuar os impactos deste montante gerado ao meio ambiente e a sociedade como um todo. De acordo com ABRECON, 2015, existem cerca de 310 usinas no país, onde, das 105 usinas analisadas sua maioria é de iniciativa privada (Gráfico 1).

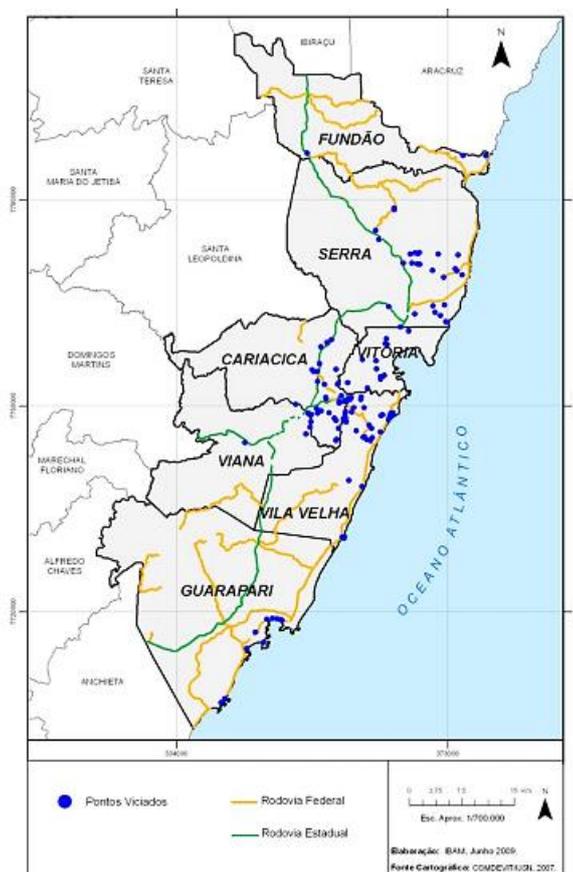
Gráfico 1 - Distribuição das usinas de RCD no Brasil (ABRECON, 2013).





Na Região Metropolitana de Vitória há elevada taxa de produção de resíduos advindos da construção civil, como também, elevada quantidade de pontos viciados (Figura 1 Erro! Fonte de referência não encontrada.).

Figura 1 - Distribuição espacial de pontos viciados na Região Metropolitana de Vitória (Plano Diretor de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Vitória, Produto 8, 2009).



De acordo com dados obtidos junto a cinco dos sete Municípios que compõem a região, é de 1.620,14t/1000habitantes/ano (Tabela 1) (Plano Diretor de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Vitória, Projeto 8, 2009).

Tabela 1 - Quantidade de RCC (Resíduos de Construção Civil) gerada por Município (Plano Diretor de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Vitória, Projeto 8, 2009).

MUNICÍPIO	HABITANTES	QUANTIDADE DE RCC
Fundão	15.209 hab.	22,3 t/1.000 habitantes/ano
Serra	385.370 hab.	952,84 t/1.000 habitantes/ano
Vitória	314.042 hab.	271 t/1.000 habitantes/ano
Cariacica	356.536 hab.	-
Viana	57.539 hab.	199,4 t/1.000 habitantes/ano
Vila Velha	398.068 hab.	-



Guarapari

98.073 hab.

174,6 t/1.000 habitantes/ano

Diante deste cenário, este trabalho tem por objetivo avaliar o processo de destinação dos resíduos, proveniente da construção civil, na Grande Vitória.

## 1.2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD) - Legislação

Há variadas fontes geradoras de resíduos na construção civil, como é possível se observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Fontes geradoras e componentes dos resíduos de construção civil. Valores em porcentagem. (IPEA, 2012).

COMPONENTES	TRABALHOS RODOVIÁRIOS	ESCAVAÇÕES	SOBRAS DE DEMOLIÇÕES	OBRAS DIVERSAS	SOBRAS DE LIMPEZA
Concreto	48	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolo	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira, lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,6	-	1,6	1	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira	0,1	1,1	1,6	2,7	3,5
Papel/material orgânico	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Além disso, devido à forte integração presente em grande parte dos insumos, estes resíduos apresentam grande heterogeneidade (Figura 2), tornando-se difícil promover a segregação dos materiais presentes.

Figura 2 - Agregado Reciclado (Disponibilizada pela Vila Recicla).



Outro aspecto importante a ser analisado no processo de produção do agregado reciclado é a presença de elementos dito contaminantes, como matéria orgânica, solventes, óleos, entre outros prejudiciais à saúde; onde estes precisam ser descartados.

Diante desta problemática em âmbito nacional resolução CONAMA nº 307 surge como método para estabelecimento de diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

Conforme a resolução supracitada, resíduos da construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, madeiras, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, tubulações etc., comumente chamados de entulhos de obras.

Também por meio desta, os resíduos são classificados como sendo de:

Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

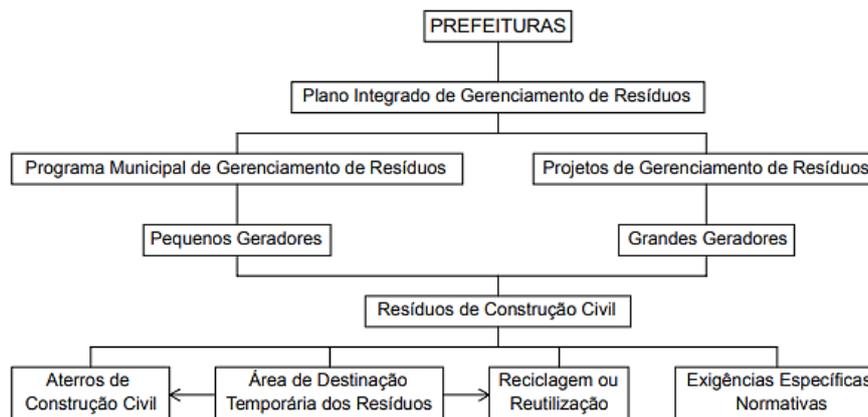


Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Além disso, a resolução estabelece técnicas e procedimentos para elaboração do Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (Figura 3) e dos Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil a serem criados pelos grandes geradores.

Figura 3 - Estrutura de gestão dos resíduos, conforme a Resolução CONAMA Nº 307 (Oh, Gonçalves e Mikos (2003)).



### 1.3. Funcionamento das usinas

Para otimização das usinas faz-se importante a organização dos processos, tendo poucas variações entre os sistemas aberto e fechado (Figura 4 e Figura 5).

A partir do recebimento do material são formadas pilhas para armazenagem, estes materiais estocados são direcionados para peneira de entrada, onde são separados do processo os inertes com granulometria inferior a 40mm. Aqueles com granulometria superior a 40 mm seguem para o britador de mandíbula, no qual também é feita a captação dos materiais metálicos. Do britador de mandíbula, os agregados são direcionados para o britador do tipo compacto de forma a se obter um material com grão inferior a 40mm.



Figura 4 - Exemplo de layout de usina fixa com sistema aberto (Cartilha curso de gestão integrada resíduos da construção civil-ABRECON).

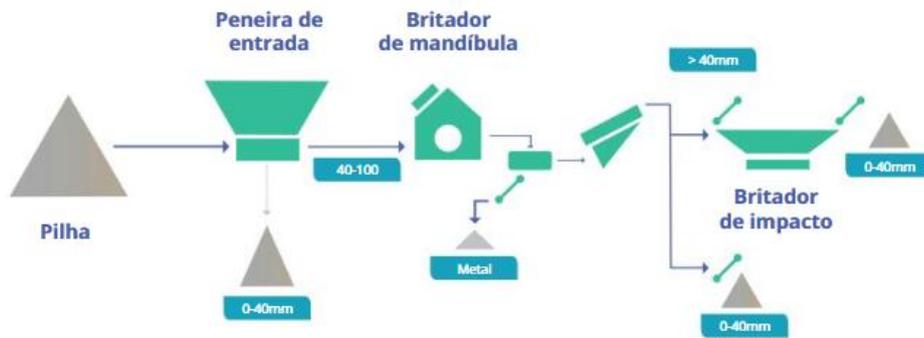
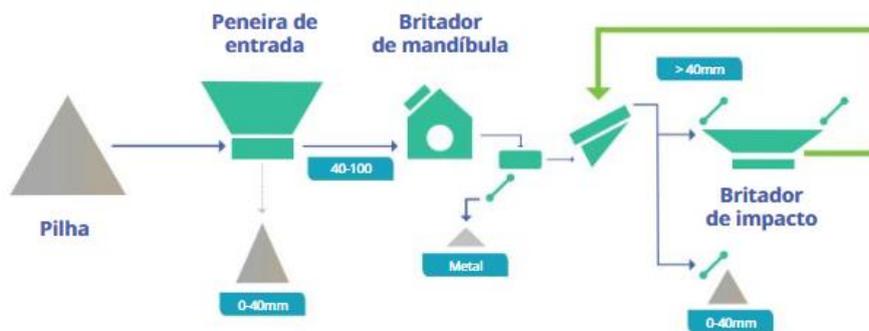


Figura 5 - Exemplo de layout de usina fixa com sistema fechado (Cartilha curso de gestão integrada resíduos da construção civil-ABRECON).





## **2. METODOLOGIA**

Inicialmente, foi realizado um levantamento das usinas de triagem e reciclagem de resíduos de construção e demolição. A área usada como referência foi a da Região Metropolitana da Grande Vitória-ES.

Para uniformizar o formato dos dados obtidos e facilitar a análise da informação, foram montados um questionário e uma planilha, contendo perguntas e campos relativos a dados qualitativos da usina, como a data de criação, origem do resíduo recebido, destino do material gerado, e dados quantitativos referentes às etapas de recebimento e processamento dos resíduos, volumes de agregados reciclados produzido e capacidade instalada das usinas.

Posteriormente, foi realizado o contato com as empresas e enviado o questionário. Além do pedido de dados, foi solicitada a realização de visita técnica nas plantas das usinas com o intuito de conhecer o processo e verificar o funcionamento próprio de cada uma.

Após o recebimento dos questionários respondidos, os dados disponíveis foram analisados e buscou-se obter uma visão geral do cenário atual da reciclagem do RCD na Grande Vitória.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo os dados da ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição), existem atualmente três usinas mapeadas no estado do Espírito Santo. São elas, Vila Recicla (Marca Ambiental), Natureza Viva e Britamar. A última usina citada foi contatada e, até o momento analisado, não oferece mais o serviço de reciclagem de RCD. Além das empresas que constam nos dados da ABRECON, a empresa Ureserra também apareceu durante as pesquisas.

Portanto, foram consideradas nesse estudo três empresas. A Vila Recicla está localizada no município de Cariacica, foi criada em 2016 e começou a operar em 2018. Por sua vez, a Natureza Viva fica em Vila Velha e teve suas atividades iniciadas em 2012. Por fim, a Ureserra está situada na Serra, foi implementada em 2014 e está sob nova direção desde 2017.

Dos três questionários recebidos, somente um teve todos os dados requisitados respondidos. Os outros dois, apresentaram ausência de algumas informações devido à política de confidencialidade da empresa ou a real falta desses dados. Das visitas técnicas solicitadas, somente foi possível a realização na planta da usina da Ureserra.

Figura 6 - Usina de Reciclagem Ureserra (autores)



As empresas serão identificadas adiante neste trabalho pelas letras A, B e C, não respectivamente, para preservar a confidencialidade dos dados.

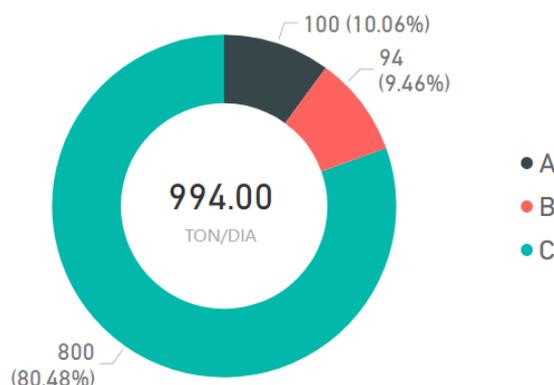
Em relação ao recebimento dos resíduos, as três empresas apresentam classificação de fornecedores semelhantes, empresas privadas de grande porte, incluindo construtoras, grandes transportadoras, demolidoras e empresas de processamento de rochas ornamentais. Os volumes



de resíduos de cada fonte citada são diferentes dependendo da empresa. Por exemplo, a empresa B recebe um volume mais constante de resíduos de rochas ornamentais quando comparado ao RCD, pois esta empresa ainda não conseguiu obter um preço competitivo em relação às empresas A e C para o recebimento desses resíduos.

O montante diário de resíduos de construção, demolição e rochas ornamentais recebido nas usinas totaliza 994 toneladas, sendo as parcelas de cada uma delas representadas no gráfico 2. Se compararmos com o valor médio apenas de RCD produzido diariamente no estado, cerca de 7.500 toneladas, temos que o resíduo recebido nas empresas de reciclagem (RCD e rochas ornamentais) representa cerca de 13% desse valor.

Gráfico 2 - Recebimento médio diário de resíduos nas usinas, em toneladas (Autores).



É importante observar que nenhuma das empresas recebe resíduo proveniente de contratos com as prefeituras. Esse fato é decorrente de que as prefeituras dos municípios da Grande Vitória não possuem ou possuem apenas um ponto de bota-fora, além disso os resíduos provenientes desse local possuem alta porcentagem de contaminantes, dificultando a segregação do material.

Sobre a composição do material recebido, a empresa B aceita receber somente resíduos classe A combinado com material metálico, com o objetivo de otimizar seu processo de separação que é feito manualmente e com o uso de eletroímãs. A fração metálica é vendida e o restante do material que não pode ser reaproveitado no processo de geração de agregados reciclados é encaminhado para um aterro de inertes.

A empresa C aceita receber um resíduo composto de materiais classe A e classe B. A separação desses resíduos é feita manualmente. Os materiais como papéis, papelões e plásticos são prensados separadamente e enviados para empresas em São Paulo que fazem a sua reciclagem,



pois é economicamente mais lucrativo. Já a parte metálica é vendida. Além disso, o material que não pode ser utilizado, devido a presença de contaminantes, é descartado.

Resíduos classificados como classe A e classe B são aceitos pela empresa A, sendo que o resíduo recebido é precificado de acordo com a porcentagem de material classe B “contaminando” o material classe A. Além disso, ela também recebe uma classe de resíduo classificado internamente como “rejeito” que é composto de materiais como sacos de cimento, grama, carpetes, manta asfáltica, espuma de revestimento, etc., que é enviada imediatamente para o aterro sanitário. Não há informações sobre o processo de segregação de material pela empresa A.

Em geral, o aproveitamento médio dos resíduos que chegam nas usinas é de 95,8% e a variação índices de aproveitamento, apresentados no gráfico 3, reflete a política de recebimento de material adotada por cada empresa, como descrito acima.

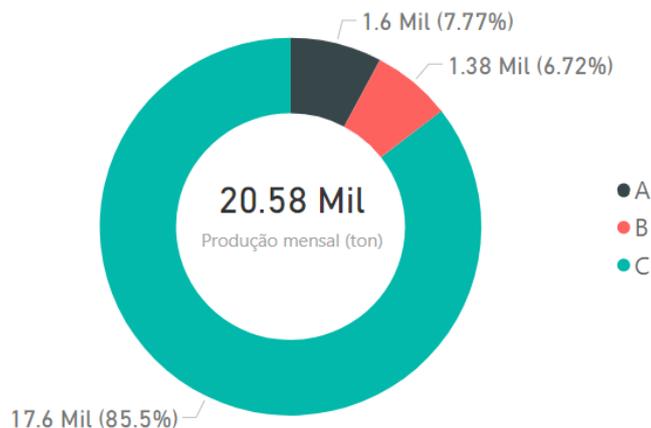
Gráfico 3 - Índice de aproveitamento do material recebido pelas usinas (Autores).



A partir do recebimento desses resíduos pelas empresas, começa o processo produtivo dos agregados. Ao fim, tem-se por mês 20.584,18 toneladas de agregado reciclado, estratificados entre as usinas da forma como apresenta o gráfico 4.

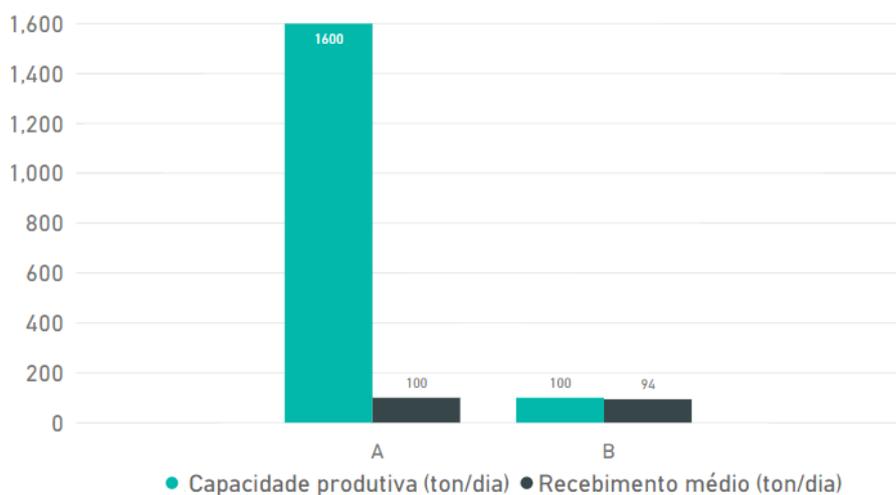


Gráfico 4 - Produção mensal de agregado reciclado na Grande Vitória, em toneladas (Autores).



No gráfico 5, pode-se analisar a capacidade produtiva das empresas A e B, visto que tal dado não foi disponibilizado pela empresa C. Observa-se que os valores de produção de agregados reciclados nessas usinas não são limitados por suas respectivas capacidades produtivas, e sim pela quantidade de resíduos recebidos.

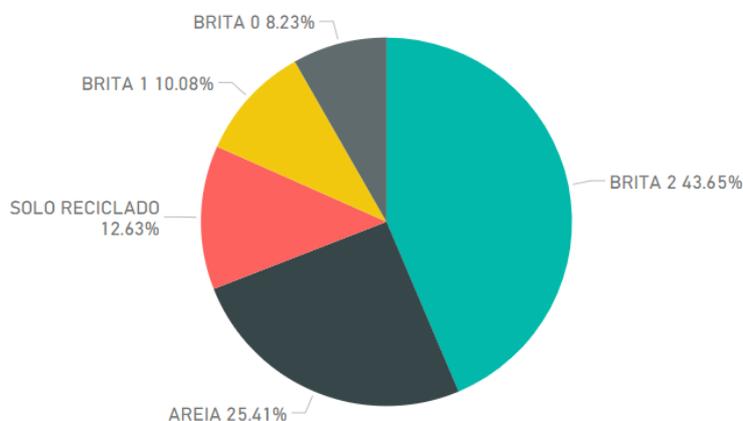
Gráfico 5 - Capacidade produtiva diária das usinas, em toneladas (Autores).



Todas as empresas produzem agregados reciclados, porém possuem algumas variações de produtos finais. A empresa A produz pó de concreto, brita 2, solo brita e rachão, a usina B produz areia, brita 0, brita 1, pó de pedra e rachão e a usina C gera areia, brita 0, brita 1, brita 2, brita corrida, pedrisco reciclado e rachão. A empresa B forneceu dados das parcelas dos tipos de agregados produzidos em sua planta, que são apresentados no gráfico 6.



Gráfico 6 - Estratificação do agregado reciclado produzido pela usina B



Segundo as informações fornecidas pelas usinas, a areia é o produto de maior saída, enquanto o rachão normalmente tem o maior estoque. Os agregados reciclados são procurados principalmente por grandes empresas e grandes construtoras, porém eles também possuem como clientes pessoas físicas.

Na Grande Vitória as principais aplicações dos agregados reciclados são para obras de terraplanagem e execução de aterro, não sendo utilizados para fins de acabamento, nem em confecção de blocos não estruturais. Os principais motivos para isso são a falta de conhecimento do produto no mercado, a falta de incentivo do governo e a elevada carga de tributos. Além disso, uma das empresas citou a inexistência do controle de variabilidade entre os lotes de agregados produzidos na própria planta e de estudos que visem viabilizar a diversificação da utilização desse material.



## **4. CONCLUSÃO**

Menos de 13% dos resíduos de construção e demolição produzidos no Espírito Santo são reciclados, apesar da capacidade das usinas instaladas no estado ser mais que o dobro da produção atual, representando cerca de 33,5%. Ou seja, há um potencial inutilizado de transformação de cerca de 29.415,82 toneladas de RCD.

Nesse contexto, as prefeituras possuem papel fundamental para a gestão desses resíduos. Deve-se atender ao CONAMA, elaborando e executando o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, por meio da fiscalização das transportadoras e dos pontos de destinação, disponibilizar aos pequenos produtores locais para recebimento e integrar esses pontos de descarte com as usinas de reciclagem.

É necessária a educação da população para a correta segregação e destinação de RCD. Por meio da conscientização, deve-se difundir hábitos para a não contaminação de caçambas dispostas em espaços públicos, tampouco descarte em terrenos baldios e beiras de estradas, além de naturalizar a exigência da certificação de destinação final de resíduo ao transportador do material.

Por fim, é necessária a definição de métodos para o controle de qualidade dentro das usinas, com o intuito de reduzir a variabilidade e melhorar a qualidade e a confiabilidade do produto final. Somente dessa forma será viável a utilização do agregado reciclado nos diversos sistemas da construção civil.



## 5. REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS(ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2018.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO(ABRECON). **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015**. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil, São Paulo, 2015.
3. INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Produto 8: Plano Diretor de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Vitória**. Espírito Santo, 2009.
4. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). **Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.
5. OH, D. Y., GONÇALVES, V.C e MIKOS, V. L.. **Análise da situação da destinação dos resíduos sólidos oriundos da construção civil em Curitiba e Região Metropolitana**. Ouro Preto - MG, 2003.



# UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÂNICA E DE FLAMABILIDADE

Carvalho, P.R.C.<sup>(1)</sup>; Alencar, K.C.<sup>(2)</sup>; Barbosa, K.S.L.<sup>(3)</sup>; Rodrigues, E.C.<sup>(4)</sup>; Costa, D.S.<sup>(5)</sup>

(1) UFPA – pricardo.com@gmail.com; (2) UFPA – krishanacalencar@gmail.com; (3) UFPA – karllaslb@gmail.com; (4) UFPA – emerson.rodrigues@unama.br; (5) UFPA – deibsonsc@yahoo.com.br

## RESUMO

Atualmente no Brasil aumentou-se significativamente a quantidade de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como expansão da construção civil, o que tem acarretado inúmeros impactos ambientais devido à destinação incorreta deste resíduo. Diante desta problemática, o artigo tem como propósito o estudo da reciclagem deste RCD, oriundo das obras da região metropolitana de Belém-PA, em compósitos de matriz poliéster isoftálica com agentes de cura (acelerador de cobalto 1,5 % e iniciador MEK-P 1 %) juntamente com resíduo nas proporções de 0, 10 e 20 % na granulometria de 100 mesh. O processo de fabricação dos compósitos foi pelo método de hand lay up em molde metálico. Foram realizados ensaios de caracterização física (Massa Específica Aparente - MEA, Absorção De Água - AA, Porosidade Aparente - PA), além de ensaios de flamabilidade e ensaios de resistência mecânica (tração). Os resultados mostram uma redução de aproximadamente 47 % na propagação à chama na proporção de 20 % de RCD, para os resultados de resistência a tração os compósitos atuaram como carga de enchimento, apresentando valores semelhantes a matriz plena, além de bons impactos econômicos e ambientais.

**Palavras-chave:** Materiais, Poliéster, Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

## USE OF WASTE FROM CIVIL CONSTRUCTION AND DEMOLITION IN POLYMERIC COMPOSITES: PHYSICAL, MECHANICAL AND FLAMMABILITY CHARACTERISTICS

### ABSTRACT

Currently in Brazil, the amount of Construction and Demolition Waste (RCD) has increased significantly with the expansion of civil construction, which has resulted in numerous environmental impacts due to the incorrect destination of this waste. In view of this problem, the article aims to study the recycling of this RCD, from works in the metropolitan region of Belém-PA, in composites of polyester isophthalic matrix with curing agents (cobalt accelerator 1.5 % and MEK-P initiator 1 %) along with residue in the proportions of 0, 10 and 20 % in the granulometry of 100 mesh. The composite manufacturing process was by hand lay up method in metallic mold. Physical characterization tests (Apparent Specific Mass - MEA, Water Absorption - AA, Apparent Porosity - PA), as well as flammability tests and mechanical strength tests (traction) were performed. The results showed a reduction of approximately 47 % in flame propagation in the proportion of 20 % RCD, for the results of tensile strength the composites acted like filling load, presenting values similar to full matrix, besides good economic and environmental impacts.

**Key-words:** Materials, Polyester, Construction and Demolition Waste (RCD).



## **1. INTRODUÇÃO**

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e, desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando como subproduto grande quantidade de resíduos de diversas naturezas. Essa atividade é também responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não renováveis. HEDRE, 2010<sup>(1)</sup>; LINTZ et al., 2012<sup>(2)</sup>. A construção civil brasileira produz um índice muito elevado de resíduos sólidos, onde é gerada, aproximadamente, uma quantidade de 500 kg/hab.ano de resíduos das atividades de construção e demolição (RCD) segundo AGOPYAN e JOHN, 2011<sup>(3)</sup>. Contudo, conforme ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001<sup>(4)</sup>, muitos destes resíduos possuem um grande potencial de reaproveitamento no próprio setor, levando a uma redução da necessidade do uso de recursos naturais.

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) define Resíduos da Construção e Demolição (RCD) como o conjunto de fragmentos ou restos de: tijolo, concreto, argamassa, aço, madeira, entre outros; provenientes do desperdício na construção, reforma ou demolição de estruturas, como: prédios, residências e pontes. No Brasil, país com dimensões continentais, este resíduo é conhecido como entulho, calça ou metralha ABRECON, 2014<sup>(5)</sup>. Apesar de ser destaque na economia de um país, a construção civil possui agravantes em razão das alterações provocadas no meio ambiente. Nesse setor, são constatados problemas ambientais desde a extração da matéria-prima em jazidas, até a destinação final dos resíduos FARIAS et al., 2011<sup>(6)</sup>. Além disso, segundo FREITAS, 2018<sup>(7)</sup>, a grande quantidade de resíduos sobrecarrega os serviços municipais de limpeza pública e pode trazer riscos à saúde populacional.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento físico-mecânico e de resistência à chama de um compósito de matriz polimérica poliéster reforçado com resíduo de construção e demolição, além de contribuir para o reaproveitamento do resíduo no desenvolvimento de um material de menor custo, visando à redução dos impactos ambientais.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Os materiais utilizados para a fabricação das placas compósitas foram: a resina poliéster isoftálica insaturada, o acelerador de cobalto na proporção 1,5 % (v/v) e o iniciador MEK-P (Butanox M-50) na proporção 1 % (v/v). Além disso, foi utilizado o resíduo de construção e demolição (RCD), o qual não passou por um processo de triagem e o mesmo contém vários fragmentos, como restos de tijolos, concreto, argamassa, etc. O material é proveniente do desperdício de demolição em uma reforma de um residencial da região metropolitana de Belém no Estado do Pará. A Figura 1 mostra a resina poliéster e o resíduo de construção e demolição utilizados.

Figura 1 – Materiais: (a) Resina Poliéster; (b) Resíduo de Construção e Demolição.



### 2.2. Métodos

A fabricação do compósito foi realizada na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

#### 2.2.1. Preparação do resíduo de construção e demolição

Primeiramente, o material foi destinado ao moinho de bolas por um período de 30 minutos, em seguida o resíduo passou por um processo manual de cominuição e por fim foi peneirado em peneira de granulometria de 100 mesh da série Tyler. Conforme a Figura 2 a seguir:



Figura 2 – Material passante na peneira de 100 mesh.



### 2.2.2. Determinação da massa específica do resíduo

A determinação da massa específica do resíduo foi feita pelo método do picnômetro, de acordo com BUENO e DEGREVE, 1980<sup>(8)</sup>. Primeiramente foi pesado a massa do conjunto picnômetro vazio ( $m_1$ ) e a massa do conjunto picnômetro + água ( $m_4$ ), verificando a temperatura da água, para determinar o volume do picnômetro (Volume corrigido), conforme a equação (A) a seguir:

$$V_c = V(1 + C\Delta T) \quad (A)$$

Onde:  $V_c$  é o volume do picnômetro corrigido para temperatura de trabalho;  $V$  é o volume do picnômetro a temperatura de fabricação;  $C$  é o coeficiente de Dilatação Térmica do Vidro; e  $\Delta T$  é a variação da temperatura de trabalho e a de fabricação.

Com isso, foi determinada a densidade aparente da água. Conforme a equação a seguir:

$$\rho_{\text{água}} = \frac{m_4 - m_1}{V_c} \quad (B)$$

Após essa etapa, foi removida toda água do picnômetro e em seguida o secou. Adicionou-se o RCD ao picnômetro e determinou a massa do picnômetro com o sólido ( $m_2$ ). Em seguida, foi adicionada água até completar o volume do picnômetro. Mediu-se a massa do conjunto picnômetro/sólido/água destilada ( $m_3$ ).



A densidade relativa do sólido ( $\rho_s$ ) e a densidade aparente do sólido ( $\rho_{ap}$ ) foram determinadas segundo as equações a seguir:

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} \quad (C)$$

$$\rho_{ap} = \rho_s \times \rho_{\text{água}} \quad (D)$$

### 2.2.3 Fabricação dos compósitos

Para a fabricação dos compósitos foi utilizado o método manual, chamado de hand lay up, associado à prensagem em molde fechado de aço inoxidável nas dimensões de 320x170 mm e com espessura de 5 mm. As proporções utilizadas foram 0, 10 e 20 % de resíduo (RCD) em relação à fração mássica do compósito, onde para método comparativo foi utilizado à proporção de 0 %.

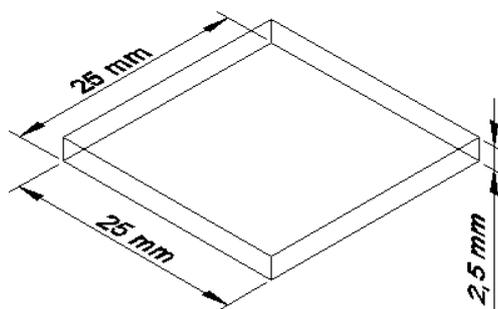
Primeiramente o resíduo (RCD) foi levado para a estufa a uma temperatura de 105° C durante 30 minutos, para retirada da umidade superficial. Em seguida, iniciaram-se a produção das placas nas dimensões de 320x170x2,5 mm. O resíduo (RCD) foi inserido na mistura polimérica (resina, cobalto e iniciador) de forma manual até sua completa homogeneização (durante um tempo de 3 a 5 minutos) para posteriormente a mistura ser despejada em um molde metálico até atingir o tempo de gel (10 a 20 minutos). Após o tempo de gel, as placas foram prensadas em prensa hidráulica (marca MARCON, modelo MPH-10) com carga de 2,5 toneladas durante 20 minutos. Posteriormente, as placas foram retiradas do molde metálico e deixadas em temperatura ambiente para o processo de cura. Após o processo de cura as placas de compósito foram cortadas com auxílio de serra de bancada seguindo recomendações das normas ASTM para cada ensaio realizado.

### 2.2.4. Caracterização física

A caracterização física se deu por meio da determinação da porosidade aparente (PA), absorção de água (AA) e massa específica aparente (MEA), seguindo recomendações das normas ASTM D 792-08<sup>(9)</sup>, ASTM D 570-98<sup>(10)</sup> e ASTM D 2734-09<sup>(11)</sup>, respectivamente. Foram confeccionados 5 (cinco) corpos de prova nas dimensões de 25x25x2,5 mm para cada série fabricada, conforme a Figura 3.



Figura 3 – Dimensões dos corpos de prova em mm.

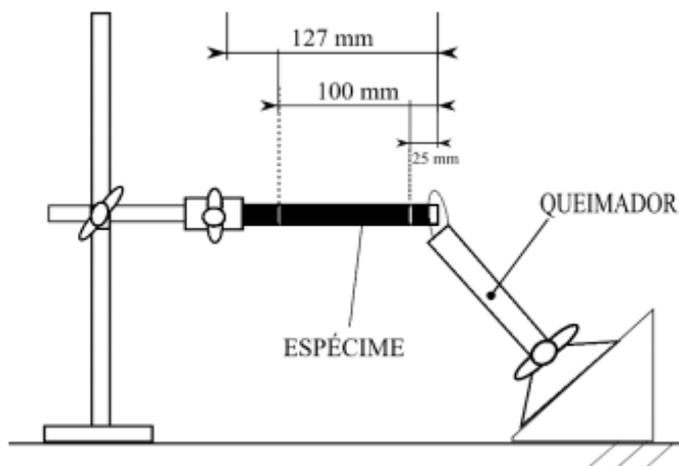


Os corpos de provas foram colocados na estufa por 24 h a 105 °C e posteriormente resfriado à temperatura ambiente. Após seu resfriamento natural, foi pesado em balança analítica de precisão para determinação da massa seca. Após este período, foi feita a imersão em água destilada por um período de 24 h para que assim seja obtida a massa úmida e pesado para a obtenção da massa submersa.

### 2.2.5. Flamabilidade

A caracterização térmica dos compósitos foi feita por meio do ensaio de flamabilidade horizontal conforme a norma ASTM D 635<sup>(12)</sup>. Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram marcados a 25 mm e 100 mm de um extremo, promovendo uma área útil de 75 mm entre as marcações, em seguida a chama foi posicionada próxima a uma marcação de 25 mm. O cronometro foi iniciado quando a chama toca a marcação e termina quando a mesma toca a outra marcação, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática do ensaio de flamabilidade horizontal.



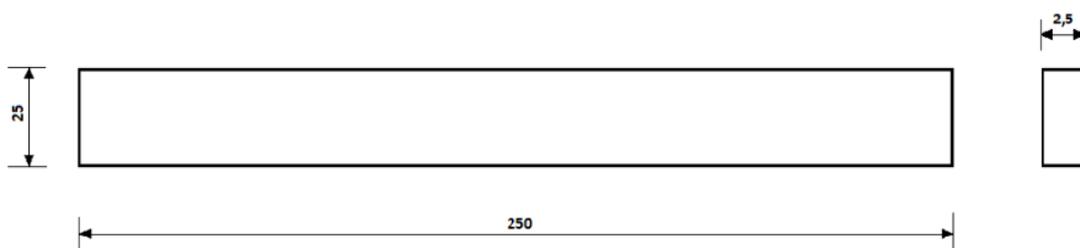
Fonte: MENDES, 2019<sup>(13)</sup>



## 2.2.6. Ensaio de Tração

O ensaio de resistência à tração seguiu recomendações da norma ASTM D-3039-08(14). Foram confeccionados 6 (seis) corpos de prova nas dimensões de 250 x 25 mm, com espessura de 2,5 mm. O corpo de prova de tração está exemplificado na Figura 5.

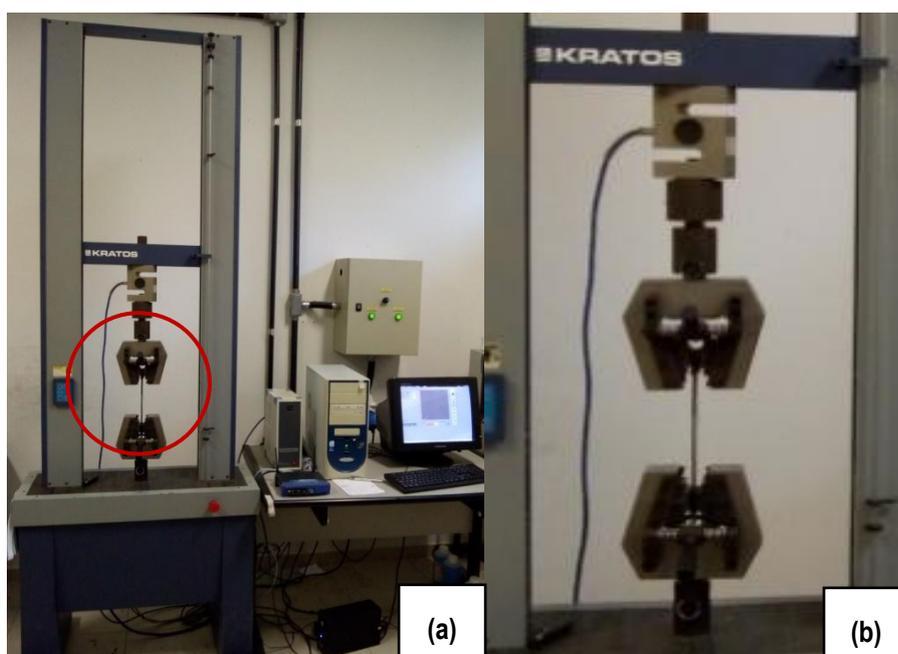
Figura 5 – Dimensões dos corpos de prova em mm.



Fonte: ASTM D 3039-08<sup>(14)</sup>

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio universal KRATOS, modelo KE 200 MP, com célula de carga de 5 kN e velocidade de aplicação de força de 2 mm/min. A Figura 6 apresenta a máquina de ensaio de tração.

Figura 6 – Máquina de ensaio: (a) Vista total frontal da máquina; (b) Vista frontal da máquina na área de engate do corpo de prova destacada num círculo vermelho em (a).



Fonte: Adaptado de TAVARES, 2018



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Propriedades físicas

Os resultados obtidos nos ensaios físicos de massa específica aparente (MEA), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) dos corpos de prova de compósito com resíduos da construção e demolição (RCD) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado das propriedades físicas dos compósitos.

Composição (%)	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	AA (%)	PA (%)
0 % (Matriz Plena)	1,1867 (± 0,0038)	1,7470 (±0,2014)	2,0727 (± 0,2337)
10 % (RCD)	1,3386 (± 0,0045)	1,9635 (± 0,2353)	2,6078 (± 0,3040)
20 % (RCD)	1,4803 (± 0,0017)	1,3417 (± 0,0554)	1,9860 (± 0,0798)

Conforme os resultados presentes na Tabela 1 observa-se um aumento da massa específica aparente, quando comparado a matriz plena, em todas as composições com carga de resíduo da construção e demolição, onde o compósito com carga de 20 % RCD obteve um aumento de 19,83 % em relação à matriz plena. Fato este é devido o Resíduo da Construção e Demolição (RCD) apresentar densidade com 1,4803 g/m<sup>3</sup> de RCD superior comparado com 1,1867 g/m<sup>3</sup> de matriz plena, conforme resultados previstos pela regra da mistura, que cada fase constituinte do compósito contribui para as propriedades efetivas do compósito, sendo essa contribuição dependente da fração volumétrica dos constituintes segundo CALLISTER, 2012<sup>(16)</sup>.

Na absorção de água (AA) e na porosidade aparente (PA) observa-se para os compósitos com adição de 10 % RCD valores superiores quando comparados à matriz plena, valores que podem ser justificados pelo alto teor hidrofílico do RCD ou pelo modo de fabricação manual dos compósitos, o que pode ocasionar o aumento de bolhas, defeitos e vazios nos compósitos. No entanto, os compósitos com adição de 20 % de RCD apresentaram resultados inferiores. Fato este é devido às propriedades de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA) serem diretamente ligadas, pois uma menor porosidade aparente implica em uma menor absorção de água. Segundo MADSEN e LILHOLT, 2003<sup>(17)</sup> e MADSEN et al., 2007<sup>(18)</sup>, o desempenho dos materiais depende de diversos fatores, como a composição e a interação das fases, que afeta de modo direto as propriedades dos compósitos.



### 3.2. Flamabilidade horizontal

Os resultados obtidos nos ensaios de flamabilidade horizontal para os corpos de prova de compósito com resíduos da construção e demolição (RCD) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Desempenho dos corpos de prova quanto à flamabilidade horizontal.

Composição (%)	Taxa de Queima (mm/min)	Redução (%)
0 % (Matriz Plena)	27,57 ( $\pm 0,70$ )	-
10 % (RCD)	18,05 ( $\pm 0,30$ )	34,53
20 % (RCD)	14,66 ( $\pm 0,84$ )	46,82

De acordo com os resultados presentes na Tabela 2 é possível observar que os compósitos com carga de resíduo de construção e demolição (RCD) obtiveram valores menores em comparação à matriz plena, ocorrendo uma redução na taxa de queima de aproximadamente 47 % (20 % RCD) em relação à matriz plena.

Os resultados do ensaio de flamabilidade mostram que ambas as amostras obtiveram valores menores do que solicitado pela norma ASTM D 635<sup>(12)</sup>, pois a mesma diz que, para uma amostra ser classificada como HB, deve apresentar uma velocidade de propagação à chama menor que 40 mm/min. Segundo o CONTRAN, 2014<sup>(19)</sup>, esse material compósito também se enquadra nos critérios dos materiais empregados no revestimento interno de habitáculos de veículos que não devem exceder 100 mm/min.

Conforme os resultados obtidos em relação à taxa de queima do material, o mesmo foi comparado com a literatura, os compósitos de resíduos de construção e demolição (RCD) estão inferiores ou semelhantes aos compósitos com a adição de lama vermelha, resíduo de caulim e resíduo de cobre apresentados pelos autores, COSTA, 2016<sup>(20)</sup>; MENDES, 2019<sup>(13)</sup>; EI BANNA, 2017<sup>(21)</sup>. Com base nisso, percebe-se que os compósitos produzidos apresentaram um bom desempenho comparado com outros particulados.

### 3.3. Ensaio de tração

Os compósitos poliméricos com inserção de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) foram avaliados de acordo com sua resistência mecânica por meio do ensaio de tração, onde foram obtidos os seguintes resultados presentes na Tabela 3.



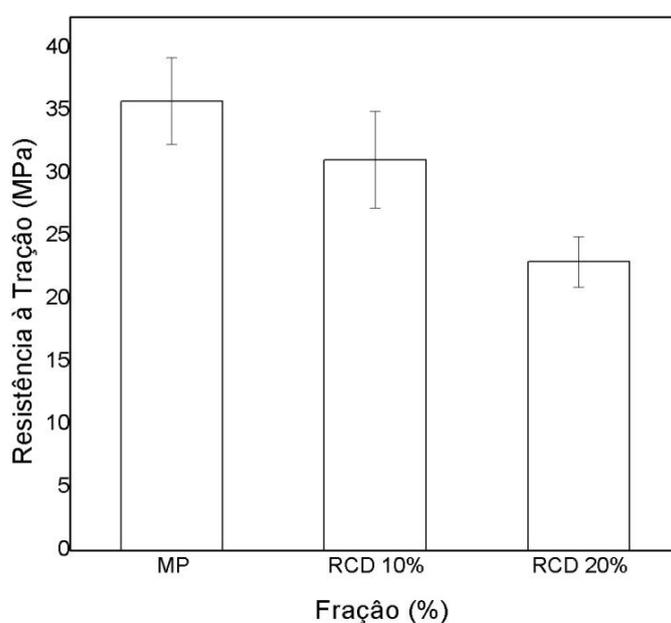
Tabela 3 – Resultados de resistência à tração.

Composição(%)	Resist. à Tração (MPa)
0 % (Matriz Plena)	35,78 (± 3,45)
10 % (RCD)	31,12 (± 3,83)
20 % (RCD)	22,98(± 2,03)

É possível observar através dos resultados presentes na Tabela 3 que a resistência mecânica à tração diminuiu gradativamente com o aumento da incorporação de resíduo de construção e demolição. Segundo COSTA, 2016<sup>(20)</sup> as propriedades mecânicas de tração diminuem de acordo com o acréscimo de carga na matriz, devido os compósitos apresentarem porosidades.

Além disso, outros fatores podem ter colaborado como a falta de trabalhabilidade e molhabilidade matriz/carga ou devido o resíduo se comportar como carga de enchimento. Contudo, a fração de 10 % de resíduo (10 % RCD) apresentou um valor de resistência semelhante à matriz de comparação (matriz plena). A Figura 5 apresenta o gráfico comparativo de resistência à tração dos compósitos fabricados.

Figura 5 – Gráfico comparativo de resistência à tração.





## 4. CONCLUSÃO

A técnica utilizada para fabricação dos materiais compósitos de matriz polimérica sugerida foi satisfatória, tendo em vista que os compósitos atingiram o processo de polimerização.

Em relação ao comportamento físico observou-se um aumento da massa específica aparente quando comparado com a matriz plena, e um aumento nas propriedades físicas de absorção de água e porosidade aparente na proporção de 10 % de resíduo.

Com relação ao ensaio de resistência á chama dos compósitos produzidos foi possível observar uma tendência de retardo da chama conforme aumentou-se a proporção de resíduo de construção e demolição na matriz, tendo uma redução de aproximadamente 47 % na proporção de 20 % RCD, mostrando assim, que a utilização deste resíduo foi eficiente na resistência á chama.

No que diz respeito à resistência mecânica de tração os compósitos com 10 % RCD obteve valor semelhante à matriz plena, ou seja, não demonstrou influência dentro da matriz polimérica, comportando-se como carga de enchimento dentro da matriz polimérica.

Os compósitos com inserção de resíduo de construção e demolição apresentaram, no geral, boas propriedades físicas, mecânicas e de resistência à chama, sinalizando, bons impactos econômicos e ambientais.



## 5. REFERÊNCIAS

1. HEDRE, L. V., **Economics** 10, 3 (2010) 183.
2. LINTZ, R. C. C., JACINTHO, A. E. P. G. A., PIMENTEL, L. L., GACHET-BARBOSA, L. A., **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais** 5, 2 (2012) 18.
3. AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da sustentabilidade na construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2011.
4. ÂNGULO, S.C., ZORDAN, S.E., JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 2001.
5. ABRECON. 2014- **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**. Disponível em: <https://abrecon.org.br/entulho/o-que-e-entulho/>. Acesso em: 24 de maio de 2019.
6. FARIAS, A. B. de, BAHIA, N. C., SUKAR, S. F. & GUSMÃO, A. D. (2011) **Diagnóstico da gestão de resíduos da construção civil no município de Olinda/PE**. In: Encontro Nacional, 6 e Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 4. 7-9 set.
7. FREITAS, L.; **Reaproveitamento de resíduos da construção civil no brasil: Revista Dom total 2018**, Disponível em <<http://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/reaproveitamento-de-residuos-solidos-da-construcao-civil-no-brasil/>> Acesso em: 24 de maio de 2019.
8. BUENO, A. W. e DEGREVE, L. **Manual de Laboratório de Físico-Química**. Mcgraw-Hill, São Paulo, 1980.
9. ASTM D 792 – 2008, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
10. ASTM D 570 – 1998, **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
11. ASTM D 2734 – 2009, **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
12. ASTM D 635 "**Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position**" Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2010.
13. MENDES, B. H. A. **Estudo da influência da incorporação de resíduo de beneficiamento de caulim nas propriedades de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de bambu**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
14. ASTM D 3039 - 2008 "**Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
15. TAVARES, A. R. D. **Caracterização mecânica e morfológica de compósitos com fibras de vidro e palha da costa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais), Faculdade de Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.



16. CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais - uma introdução**. 8 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
17. MADSEN, B; LILHOLT, H.; **Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites – an evaluation of the influence of porosity**. Composites Science and Technology, v.63, p. 1265-1272, 2003.
18. MADSEN, B; THYGESES, A.; LILHOLT, H.; **Plant fibre composite – porosity and volumetric interaction**; Composites Science and Technology, v. 67, p. 1584-1600, 2007.
19. CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução n°. 498- **"Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos automotores nacionais e importados."**, 29 de julho de 2014.
20. COSTA, D. S. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais. Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.
21. EL BANNA, W. R. **Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (musa sapientum, musacae)**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Pará, Belém, 2017. 150 f.

# ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO RESÍDUO DO PÓ DE GESSO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA RECICLAGEM E PRODUÇÃO DE PEÇAS DECORATIVAS

Cristian S. Nunes<sup>1</sup>, Gessica C. Zambrano<sup>1</sup>, Ângela Maria A. Costa<sup>1</sup>, Ruthe C. Reis<sup>1</sup>,

Aleson M. Quaresma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Discente da Universidade Federal do Pará.

Rodovia BR 422 km 13 – Canteiro de Obras UHE - Vila Permanente, Tucuruí - PA, 68464-000.

Christian\_tur@hotmail.com, hikari8149@gmail.com, Lanarte\_angel@hotmail.com, Ruthe40@hotmail.com, ale.bquaresma@gmail.com

**Abstract.** The determination of the free water and water of crystallization, the contents of Calcium Oxide and Sulfuric Anhydride and the determination of the unit mass and grain size are some of the requirements in the norms ABNT NBR 12130: 2017 and ABNT NBR 12127: 2017, so that, soon after laboratory tests the gypsum dust residue from the construction industry can be reused. The present article aims to highlight the process of characterization of gypsum dust residue taking into account Physical-chemical attributes, in addition to reusing it to make decorative pieces. The results of the chemical and physical tests on the construction residue presented a good adaptation to the current norms, the decorative pieces obtained from the residue were viable.

**Keywords:** Gesso; Físico-químicos; Decoratives parts

**Resumo.** A determinação da água livre e água de cristalização, dos teores de Óxido de Cálcio e do Anidrido Sulfúrico e a determinação da massa unitária e de granulometria são alguns dos requisitos presentes nas normas ABNT NBR 12130:2017 e ABNT NBR 12127:2017, para que, logo após ensaios realizados em laboratório o resíduo do pó de gesso oriundo da construção civil possa ser reutilizado. O presente artigo tem como objetivo destacar o processo de caracterização do resíduo do pó de gesso levando em consideração atributos Físico-químicos, além de reutilizá-lo para fabricar peças decorativas. Os resultados dos ensaios químicos e físicos feitos no resíduo de construção apresentaram uma boa adequação as normas vigentes, as peças decorativas obtidas a partir do resíduo foram viáveis.

**Palavras-chave:** Gesso; Físico-químicos; Peças Decorativas

## 1. Introdução

O gesso em sua forma pura é denominado gipsita tem basicamente em sua composição química os seguintes elementos: Óxido de Cálcio CaO (32,5%), Anidrido Sulfúrico SO<sub>3</sub> (46,6%) e água H<sub>2</sub>O (20,9%) BALTAR et al. (2005), já em sua forma transformada ou o gesso propriamente dito outros elementos são incorporados ao mesmo como o Fósforo (P), Enxofre (S), Ferro (Fe), entre outros, BARSOSA et al. (2014). Segundo OLIVEIRA et. al (2012) a gipsita cristaliza-se no sistema monoclinico, apresenta a classe prismática, biaxial positivo. Ainda, segundo os autores, os termos "gipsita", "gipso" e "gesso" são usados frequentemente como sinônimos.

Os termos gipsita e gipso podem ser denominados igualmente o mineral em estado natural, enquanto gesso indica o produto industrial calcinado a 160-180 °C, hemi-hidratado, mineralogicamente conhecido como bassanita (CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O), após sua transformação o assim já denominado gesso o produto é utilizado em vários setores da vida cotidiana, como na hospitalar para realinhamento ósseo e na construção civil em diversas formas, uma delas é como decorativa.

A construção civil é um dos maiores causadores de transformações sócio-espaciais, pois o mesmo exige uma grande demanda no uso de mão de obra, financeira e de matérias-primas. Desse modo é de suma importância a realização de pesquisas voltadas a tornar o setor capaz de reduzir o desgaste ambiental causado e melhorar o tratamento empregado no armazenamento e reutilização dos resíduos gerados pelo mesmo.

Como a atividade econômica não é capaz de violar as leis da conservação da matéria e da energia, todos os produtos da sociedade transformam-se em resíduos. Estes resíduos são lançados no meio ambiente em todos os estágios da atividade econômica: extração, processamento, distribuição e consumo. Os efeitos sobre o meio ambiente, e conseqüentemente, sobre o homem vão dos danos temporários à completa extinção de recursos COELHO (1994). Para minimizar tais efeitos, muitas nações desenvolvidas têm traçadas estratégias para o tratamento dos resíduos e mais recentemente, para reduzi-los.

Depois da nova resolução de nº 469 do CONAMA de 29 de Julho de 2015, onde o gesso passa a integrar o grupo B dos materiais residuais da construção civil, que corresponde aos materiais recicláveis, o estudo do resíduo do pó de gesso vem contribuindo para a diminuição deste material. Usando um conceito global e atuando localmente, a ideia de

reciclagem do resíduo de gesso tornando-o novamente um material de valor agregado, vem colaborar para a diminuição da extração da matéria prima Gipsita, atuar no setor construtivo e sócio ambiental, além de preservar o meio ambiente. Os resíduos sólidos produzidos nas construções civis geralmente são descartados em aterros sanitários ou lixões clandestinos, sob responsabilidade algumas vezes das prefeituras, outras vezes das construtoras.

Cada obra deveria acondicionar os seus resíduos sólidos, normatizados pelas associações técnicas, contudo, muitas vezes isso não acontece. Verificou-se, que na cidade de Tucuruí, localizada no Sudeste do Pará, nenhum agente público ou do setor privado atua na gestão do resíduo do gesso e que devido ao aumento do consumo pela construção civil, o rejeito deste material tem sido um agravante paralelo ao crescimento do comércio da indústria gesseira local que não tem destinação adequada e também não conhecem nenhum método de reutilização para ser aplicado na região.

Não foram encontrados muitos estudos sobre o emprego desse material no desenvolvimento de peças decorativas, o que distingue para a revolução da pesquisa cujo objetivo geral é verificar a viabilidade técnica da reciclagem de resíduos de gesso encontrados na construção civil da cidade de Tucuruí-PA, analisar as propriedades físico- químicas como: determinar água livre e água de cristalização, os teores de Óxido de Cálcio e do Anidrido Sulfúrico e a determinação da massa unitária e de granulometria do mesmo e produzir peças decorativas após os resultados dos ensaios realizados.

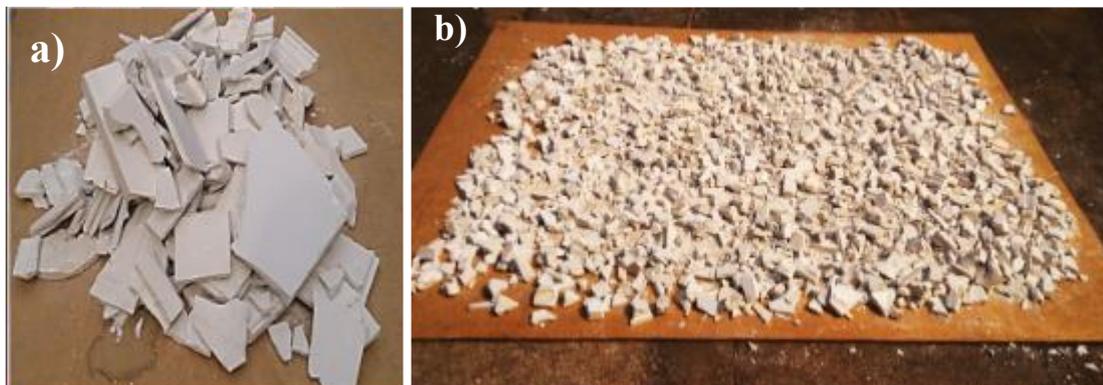
## **2. Material e métodos**

Para a realização do experimento fez-se necessário a obtenção de resíduos de gesso oriundo da cidade de Tucuruí, o mesmo foi obtido da execução de aplicação de forro com peças pré-moldadas. Para a pesquisa foi adotada a sigla (GR) para o gesso reciclado. O RG foi obtido a partir da coleta em uma determinada obra no município de Tucuruí –PA, onde a empresa responsável pelo serviço descartava os resíduos em caçambas estacionárias situadas próximo a obra. Todo o material utilizado foi proveniente de placas pré-moldadas de execução de forro. Vale ressaltar que a coleta foi realizada logo após o descarte evitando assim que o material se misturasse a outros produtos.

Com o material em laboratório optou-se por fazer uma triagem para separar impurezas que pudessem interferir nos resultados. Todo o resíduo recolhido foi grossamente triturado

com marreta e dele foram retirados materiais como: arames, fibras de sisal e gesso cola. A Figura 1 mostra o resultado desta triagem.

**Figura 1** – a) Gesso coletado; b) Gesso após triagem.



Fonte: Autores (2018).

Os ensaios foram realizados em laboratório de química da UFPA Campus Tucuruí, para que o resíduo se adeque as norma ABNT NBR 12130:2017 e ABNT NBR 12127:2017, os reagentes usados foram de grau analítico e vidrarias como: Béquers, Erlemeyers e Buretas de variadas volumetrias.

**Determinação da água livre:** Tomou-se uma amostra de 50g e posteriormente foi levada à estufa na temperatura de 40°C durante 24 horas. O ensaio de determinação de água livre verifica a quantidade de água que a massa possui. **Água de cristalização:** Iniciou-se com a separação da amostra de 2g obtida no ensaio de água livre e levada a estufa à temperatura de 230°C durante 24 horas, a amostra foi pesada e nomeada M2. Este ensaio determina a quantidade de água responsável para a cristalização da partícula.

**Preparação da amostra:** Foi preparada uma amostra de 0,5g e embebida em 70mL de Ácido Clorídrico e levada a estufa, em seguida digerida em banho-maria, a amostra foi filtrada e diluída para 250mL e armazenada. **Teor de Óxido de Cálcio:** Iniciou-se o ensaio coletando uma alíquota de 100mL do filtrado e adicionando 1mL de Ácido Nítrico reduzindo o volume para 200mL e aquecido, foi adicionada a solução de Cloreto de Amônio gotas de Vermelho de Metila e Hidróxido de Amônio ate que a coloração mude de vermelho pra amarelo, após deixada em banho-maria, filtrou- se e lavou-se com solução de Nitrato de Amônia, foram acrescidos 30mL de Oxalato de Amônio reduzindo o filtrado para 250mL deixando-o em banho-maria, filtrou-se e lavou- se adicionando logo em seguida solução de Ácido Sulfúrico (1+1) e 200mL de água, por fim titulou-se com solução de Permanganato de Potássio 0,1N até a mudança de coloração para rosa - claro.

Teor de Anidrido Sulfúrico: Foi tomada uma alíquota de 10mL do filtrado armazenado e reduzido pra 200mL em água, aquecido e enquanto quente adicionados 10mL de Cloreto de Bário deixado em repouso por 24 horas e filtrado o precipitado residual foi colocado em cadinho e calcinado em 900°C em Mufla, pesado e anotado como M3.

Ensaio de Granulometria: Uma amostra de 300g do material foi passada na peneira 2 mm, da amostra anterior foi retirado 210g para atingir massa constante em estufa à 40°C. Em seguida uma nova amostra de 50g foi passada na peneira 0,29mm. Este ensaio classifica as partículas quanto ao tamanho segundo uma série de peneiras.

Ensaio de Massa Unitária: Os parâmetros tratam-se da relação entre a massa não compactada de material e o volume do recipiente. Inicialmente foi feito a tara do recipiente a ser utilizado, onde o mesmo foi colocado embaixo do funil adaptado com peneira 2mm. Posteriormente, amostras de 100g de resíduo foram colocadas para passar pelo conjunto até o enchimento do recipiente, na sequência fez-se o rasamento e pesagem do conjunto.

O ensaio da relação água/gesso é determinado quando a penetração na pasta alcança 3mm estabelecido pela norma. O ensaio de consistência normal fixa a relação água/gesso para que a pasta obtenha uma fluidez adequada para manipulação. Este ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 12128:2017a. A ABNT NBR 12128:2017b, estabelece como tempo de pega os tempos decorrido entre o início de pega e fim de pega a qual foram realizados os ensaios.

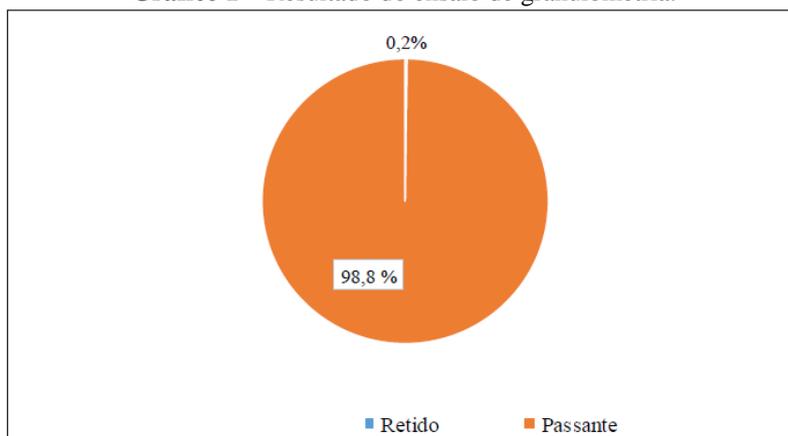
A pasta foi feita para produção de peças decorativas e colocadas em formas de EVA que foram lubrificadas com óleo desmoldante, até o tempo de pega. Após as peças foram deformadas para que, logo após, sejam moldadas para melhor acabamento.

### **3. Resultados e discursão**

Os parâmetros para os resultados da granulometria foram estabelecidos pelos itens da norma ABNT NBR 12127: 2017 que se refere ao gesso de fundição para a construção civil. Entretanto, vale ressaltar, que na referida norma apesar de citar a utilização de uma série de peneiras elas não aparecem durante os procedimentos descritos para o gesso de fundição. Contudo, os ensaios realizados atenderam especificamente a metodologia descrita na ABNT NBR 13207:2017, que estabelece parâmetros de aceitação do gesso de fundição para a construção civil, prevê como requisito o material de gesso passante na peneira 0,29mm seja  $\geq$  90%.

Estabelecidos os critérios, os resultados obtidos para a granulometria consistiram no peneiramento do resíduo na peneira de abertura nominal 0,29mm em duplicata, o material retido atendeu aos requisitos fixados, após término do peneiramento a massa retida teve um peso de 0,1g nas duas amostras ensaiadas. O Gráfico 01 exibe o resultado do ensaio. Conforme o Gráfico 01, o material passante pela peneira de abertura nominal de 0,29mm foi de 98,8 %, o material retido foi de 0,2%. Sendo assim, o material ensaiado atendeu a norma que estabelece a aceitação do gesso para fundição em grau de tamanho das partículas.

**Gráfico 1** – Resultado do ensaio de granulometria.



Para determinação da massa unitária os procedimentos realizados com o resíduo de gesso foram de acordo com o que preconiza a ABNT NBR 12127: 2017b foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 1. De acordo com o gráfico 1 e tabela 1 os ensaios de massa unitária e granulometria atenderam os parâmetros da ABNT NBR 13207:2017 pode ser considerada satisfatória a razão da massa e o volume do recipiente tem que ser  $\geq 600 \text{ g/cm}^3$ . De acordo com o resultado a massa unitária do ensaio do gesso reciclado atendeu aos parâmetros exigidos.

**Tabela 1** – Resultado do ensaio de massa unitária do resíduo de gesso.

MATERIAL	Mu (g/cm <sup>3</sup> )	Mu exigido pela NBR 13207:2017
Resíduo de Gesso	910,47	Mu $\geq$ 600

Para CAVALCANTI et al.(2012) a caracterização do resíduo de gesso consistiu nos seguintes ensaios: massa unitária seguindo os parâmetros da norma (NBR MB 3468(ABNT, 1991)); já o ensaio granulométrico foi realizado por meio de granulometria a laser, com o equipamento Mastersizer Micro. Os resultado encontrados por CAVALCANTI et.al. (2012) apresentaram no resíduo de gesso estudado a massa unitária de 0,997g/ml. Para sua

granulometria, o equipamento Mastersizer Micro apontou uma concentração de 80% para os grãos com até 75µm, demonstrando neste estudo que os ensaios físicos no resíduo de gesso pode ser feito por outros métodos e atenderem outras normas, conforme mudança na quantidade de gesso analisado.

Cabe salientar que a nova versão da ABNT NBR 13207: 2017 que estipula parâmetros de aceitação do gesso para a construção civil já padroniza o gesso como sendo de origem comercial ou reciclado. Neste contexto, a NBR mencionada já considera gesso reciclado na base de suas exigências. Sendo possível assim, o descarte de ensaios comparativos.

De acordo com pesquisas de CARDOSO (2016), em seus ensaios de re-calcinação em diferentes temperaturas 100, 150 e 180 ° C, obteve-se uma massa unitária respectiva de 518,0237, 518,53 e 519,56 g/cm<sup>3</sup>. Vale ressaltar, que os resultados encontrados na presente pesquisa na temperatura de 140°C, foram superiores aos obtidos por CARDOSO (2016).

Os ensaios físicos de granulometria e massa unitária foram realizados utilizando-se de 2Kg do resíduo de gesso, onde o mesmo foi coletado em canteiros de construção civil da cidade de Tucuruí-Pa, após secado ao sol por cerca de 48 horas.

De acordo com resultado da tabela 2, o teor de água livre está de acordo com a ABNT NBR 13207:2017 que estabelece para limite máximo de água livre 1,3 %. Para água de cristalização, a norma aplica os valores de 4,2 a 6,2%, entretanto os resultados obtidos marcaram 1,5% em 0,50g de gesso reciclado (GR). Para os ensaios de teores de Óxido de Cálcio (CaO) o ensaio determinou um teor de 23,84 %, inferior ao valor de teor mínimo de 38% que determina a NBR. Para teores de Anidrido Sulfúrico (SO<sub>3</sub>) do resíduo de gesso foram encontrados neste trabalho, valores de 59% em 0,2g um valor acima do que determina a norma ABNT NBR 13207: 2017 que é de no mínimo 53%, uma vez que ficando em repouso a 900° em forno Mufla o mesmo atingiu massa constante e após os cálculos utilizando a massa encontrada foi determinada sua porcentagem.

**Tabela 2** – Resultados dos ensaios químicos do resíduo de gesso.

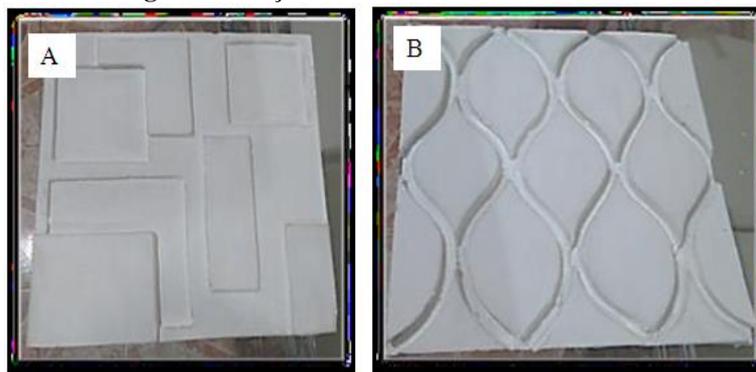
	Água livre	Água de cristalização	Óxido de Cálcio (CaO)	Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )
<b>Valor obtido (%)</b>	0,43	1,5	23,84	59
<b>Exigido pela NBR 12130:2017 (%)</b>	Máx. 1,3	4,2 a 6,2	Mín. 38	Mín. 53

Esses valores dos ensaios químicos são dados que auxiliam na padronização do material ensaiado em termos da composição química do gesso. E, embora os teores de Óxido

de Cálcio não tenham alcançado o valor mínimo, observa-se por análise, que os valores para a água total do composto foram satisfatórios e que relativamente o valor da anidrita do composto analisado está superior a 90%. Segundo Baltar et al(2005) apud Calvo (2003), a anidrita só assume outra forma sob temperaturas que variam de 180 a 250°C, visto isso e utilizando da normatização o ensaio foi realizado sobre influencia acima de tal temperatura.

Para a produção das peças decorativas através da reciclagem de gesso, adotou-se a consistência normal de 0,51 da relação água/resíduo de gesso, sendo respeitados os tempos de pega de acordo com os ensaios realizados. Após o término do tempo de fim de pega as placas foram desformadas, apresentando o resultado mostrado na Figura 2. A imagem demonstra os resultados obtidos após a análise química do resíduo e que atenderam em grande parte a norma 12130 e mostra peças feitas com o resíduo. Observou-se que para ambas as peças houve um escurecimento causado pelo óleo desmoldante que foi passado nas fôrmas.

**Figura 2** – Peças decorativas desformadas A e B.



Na peça A percebeu-se que pela baixa trabalhabilidade da pasta não foi totalmente desincorporados as bolhas de ar e que pelo grau de detalhes a placa não teve um acabamento uniforme, na peça B as fendas de detalhes do molde não tiveram uma profundidade que permitisse a placa resistir a esforços nas suas partes mais delgadas, que vieram a se romper. Percebeu-se ainda, que o tamanho adotado da placa comprometeu ainda mais a trabalhabilidade da pasta. Contudo, observou-se que as placas eram viáveis, cabendo alguns ajustes nos dimensionamentos das formas e nos detalhes imprimidos por elas.

#### **4. Conclusão**

O gesso reciclado produzido em laboratório foi ensaiado segundo as exigências normativas vigentes e pode-se observar que quanto aos requisitos do pó o resíduo atende na granulometria com mais de 90% de material passado na peneira de abertura nominal 0,29mm

e de massa unitária 910,47g/cm<sup>3</sup>. Nos ensaios químicos o resíduo atende nas determinações da água livre e de cristalização que chegaram ao resultado de 0,43% e 1,5% respectivamente.

A verificação do teor de Anidrido Sulfúrico na amostra foi de 59%, já o resultado quanto ao teor de Óxido de Cálcio os resultados mostraram que a amostra ficou abaixo do mínimo especificado pela norma. O estudo mostrou que existe a possibilidade de usar o resíduo de gesso para a reciclagem e para a fabricação de peças para uso na construção civil e decoração de ambientes.

E dessa forma, atuar na diminuição dos impactos ambientais promovendo a ideia de sustentabilidade no município de Tucuruí, Sudeste do Pará. Considerando a importância de novos estudos com o resíduo de gesso da construção civil, tem-se como sugestões para trabalhos futuros a serem realizados na área: Fazer ensaios com a combinação do resíduo ao gesso não utilizado para a obtenção de novos resultados.

Estudar a reciclagem do gesso com vários níveis de consumo energético para a produção do resíduo em termos econômicos mais viáveis, Estudo da adição de aditivos ao resíduo que melhore a sua trabalhabilidade, Inserção do resíduo em sua forma diidratada em agricultura, para melhoramento do solo e qualidade de água em locais de estiagem, E por fim, a inserção do resíduo em outras atividades visando a contemplação da sustentabilidade e ajudando na problemática do RCD na construção civil.

## **5. Referências bibliográficas**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12127: gesso para construção – determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12130: gesso para construção – determinação da água livre e de cristalização e teores de oxido de cálcio e anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13207: gesso para construção civil – apresentação. Rio de Janeiro, 2017.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. Gipsita. CT2005-122-00. Rio de Janeiro: CETEM-Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. 449-459 p. Comunicação Técnica. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1079/2/21.GIPSITA%20ok.pdf>. Acesso em: 16 de Agosto de 2018.

A.A. A. Barbosa, A. V. Ferraz<sup>1</sup>, G. A. Santos (2014); Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso  $\beta$  obtido do pólo do Araripe. Artigo científico. Grupo de Pesquisa em Materiais - GPEM, Instituto de Pesquisa em Ciência dos Materiais - IPCM. Universidade Federal do Vale do S. Francisco, Campus Juazeiro, BA, Brasil. Juazeiro –BA.503 p. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n356/v60n356a07.pdf>. Acesso em: 16 de Agosto de 2018.

CARDOSO, L. M. (2016), Influência das diferentes temperaturas de recalcinação nas propriedades da pasta de gesso reciclado. Universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do sul – unijui. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/12345679/4068/Lucina%20Machado%20Cardoso.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 de Agosto de 2018.

CAVALCANTI, R. A. A.; ALVES, B. C. A.; ROMANO, R. C. O.; JOHN, V. M. ; PÓVOAS, Y. V. (2012). XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - 29 a 31 Outubro 2012 - Juiz de Fora. 2579 p. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2012/docs/1310.pdf>. Acesso em: 16 de Agosto de 2018.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 29 de Julho de 2015. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em: 12 de Agosto de 2018.



## ESTADO DA ARTE DO USO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO EM PAVIMENTOS

**Thomas Schatzmayr Welp Sá<sup>(1)</sup>; Romildo Dias Toledo Filho<sup>(2)</sup>; Sandra Oda<sup>(3)</sup>; Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar<sup>(4)</sup>**

(1) COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: thomas.sws@poli.ufrj.br; (2) COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: toledo@coc.ufrj.br; (3) POLI - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: sandraoda@poli.ufrj.br; (4) FAU - Universidade Federal do Rio de Janeiro – e-mail: vivian@coc.ufrj.br

### RESUMO

As atividades de mineração, no Brasil, desempenham um importante papel social e econômico no país. Aliado a este fato, a mineração produz uma grande quantidade de rejeitos, os quais a destinação é um desafio econômico e ambiental para as empresas mineradoras. Os resíduos de mineração são estudados como fonte alternativa de materiais para diversas aplicações, e, dentre elas, para a construção de pavimentos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento da pesquisa relacionada ao uso de rejeitos de mineração em pavimentos. Foram encontrados trabalhos relacionados aos rejeitos de minério de ferro, bauxita, cobre e tungstênio. O rejeito de minério de ferro apresentou maior número de publicações e, conseqüentemente, uma maior abrangência de temas explorados, quando comparado com os demais. Os rejeitos de mineração foram estudados em misturas asfálticas, misturas cimentícias para pavimentos rígidos e blocos de pavimento intertravado, e, em misturas para compor as camadas de base, sub-base e reforço de subleito.

**Palavras-chave:** rejeito de mineração; pavimentação; materiais alternativos

## STATE-OF-THE-ART USE OF MINING TAILINGS IN PAVEMENTS

### ABSTRACT

Mining activity, in Brazil, plays an important social and economic role on the country. Allied to this fact, the mining activity produces a large quantity of mining tailings, which destination are an economical and environmental challenge to mining companies. The mining tailings are been studied as an alternative material source for different applications, and amongst them, for pavement construction. This article presents the research development related to the use of mining tailings in pavements. Publications related to iron ore bauxite (red mud), copper and tungsten tailings were found. The iron ore tailings presented the majority of publications, and, consequently, a wider range of themes explored, when compared to the others. The mining tailings were studied in asphalt mixtures, cement mixtures for rigid pavements, concrete interlocked pavement, and, in base, subbase and subgrade layers.

**Key-words:** mining tailings, pavements, alternative materials.



## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países produtores de minérios. A indústria extrativa brasileira teve participação de 2,1% no PIB, em 2015, com um crescimento de quase 5% em relação ao ano anterior<sup>(1)</sup>. As substâncias minerais com maior destaque, em toneladas, no setor de mineração brasileiro são: o ferro, calcário, bauxita, fosfato, manganês e caulim<sup>(2)</sup>. A tabela 1 apresenta a produção beneficiada de alguns dos principais minérios extraídos no Brasil e a respectiva participação mundial. No cenário mundial, o Brasil destaca-se por ser o maior produtor de nióbio, o segundo maior produtor mundial de tântalo e magnesita e o terceiro maior produtor de bauxita, ferro, crisotila e grafita natural<sup>(1)</sup>.

Tabela 1 – Produção beneficiada de algumas das principais substâncias minerais no Brasil

Substância	Produção Beneficiada 2015 (t)	(%) do Mundo 2015
Bauxita	35.715.410	13,0
Calcário Agrícola	29.433.000	-
Cobre	265.469	1,4
Crisotila	232.052	12,0
Cromo	526.744	1,7
Ferro	430.838.137	13,0
Fosfato	6.100.000	2,7
Grafita Natural	81.762	6,9
Magnesita	1.621.425	18,9
Nióbio	80.465	93,1
Níquel	43.936	7,0
Ouro	84.814	2,8
Tântalo	268	20,3
Titânio	80.975	1,3
Tungstênio	432	0,5
Zinco	270.714	1,2

Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2016)<sup>(1)</sup>

A atividade de mineração causa um grande impacto ambiental em seu local de extração. Grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados, e a geração de resíduos depende da localização da jazida em relação à superfície, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e do processo de extração do minério<sup>(2)</sup>.

Os dois principais resíduos sólidos gerados pelo processo de extração são os estéreis e os rejeitos. Os estéreis, também conhecido como lavra, são os materiais gerados pelas atividades de extração que ficam dispostos em pilhas, mas não têm valor econômico. Os rejeitos são gerados a partir do processo de beneficiamento dos minérios, que busca “purificar” o minério, removendo minerais associados sem valor econômico, aumentando a qualidade ou o teor do produto final<sup>(2)</sup>.



Na gestão dos rejeitos de minérios, a reciclagem e o reuso são estratégias mais favoráveis do que a simples disposição dos rejeitos, usualmente feita em diques ou barragens.

As obras de pavimentação estão relacionadas a um grande consumo de materiais e, portanto, de elevado custo financeiro. Além disso, são causados impactos ambientais significativos para a extração dos agregados naturais utilizados para compor as camadas dos pavimentos<sup>(3)</sup>. O uso dos rejeitos de minério de ferro em obras de pavimentação apresenta uma nova finalidade para o rejeito, gerando um desenvolvimento sustentável, reduzindo a necessidade de agregados naturais, e, possivelmente, reduzindo os custos para a construção de novos pavimentos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a atual conjuntura da pesquisa relacionada à utilização de diversos rejeitos de mineração em pavimentos, apresentando resultados de ensaios obtidos por diferentes autores, mostrando a viabilidade técnica do uso de rejeitos de mineração em pavimentos.

## **2. REJEITOS DE MINERAÇÃO**

### **2.1. Rejeitos de Minério de Ferro**

Dentre os rejeitos de mineração estudados nesse trabalho, o rejeito relacionado ao minério de ferro é aquele que se encontra com a pesquisa mais desenvolvida. Tal fato está relacionado com a grande participação desse mineral na economia brasileira e com a elevada quantidade de mineral extraída anualmente. Em 2015, o Brasil era o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro, com o valor da produção chegando a 41,9 bilhões de reais<sup>(1)</sup>. Em 2005, o minério de ferro era responsável por cerca de 32,95% dos rejeitos de mineração gerados no Brasil, com expectativas de ultrapassar os 40% nos anos seguintes<sup>(2)</sup>. Neste trabalho, a utilização de rejeito de minério de ferro em pavimentos foi dividida em 6 classes:

- Classe I - Misturas de solo e rejeito;
- Classe II - Misturas estabilizadas quimicamente;
- Classe III - Misturas estabilizadas granulometricamente;
- Classe IV - Concreto;
- Classe V - Piso Intertravado;
- Classe VI - Misturas Asfálticas.

As características experimentais e os resultados obtidos para cada classe são apresentados a seguir.



### 2.1.1. Misturas de Classes I, II e III

As misturas pertencentes às classes I<sup>(3)(4)(5)</sup>, II e III<sup>(6)(7)(8)</sup> foram desenvolvidas com o mesmo intuito: de aplicar os rejeitos em camadas estruturais de pavimentos, como camadas de base, sub-base e reforço de subleito. A classe I pode ser subdividida em duas subclasses: I-a) Misturas de rejeito de minério de ferro, com solo granular, e, I-b) Misturas de rejeito de minério de ferro com solo laterítico. A classe II é dividida em 3 subclasses: classe II-a, para misturas estabilizadas com cimento; classe II-b, para misturas estabilizadas com cal; e classe II-c para misturas estabilizadas com escória.

A Tabela 2 apresenta as características das misturas estudadas e as devidas proporções dos materiais utilizados.

**Tabela 2 - Composições das misturas estudadas – Classes I, II e III.**

Classe I-a		Classe I-b		Classe II-a	Classe II-b	Classe II-c	Classe III	
% de Rejeito	% de Solo Granular	% de Rejeito	% de Solo Laterítico	% de Cimento	% de Cal	% de Escória	% de Rejeito	% de Escória
0%	100%	0%	100%	1%	1%	1%	30%	70%
15%	85%	10%	90%	2%	2%	2%	50%	50%
25%	75%	20%	80%	3%	-	-	70%	30%
40%	60%	30%	70%	4%	-	-		
50%	50%	40%	60%	5%	5%	5%		
100%	0%	50%	50%	10%	10%	10%		

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

As análises e ensaios abordados compreenderam caracterizações físicas<sup>(3)(4)(5)(6)(7)(8)</sup>, químicas<sup>(3)(4)(5)(6)(7)(8)</sup>, mecânicas<sup>(3)(4)(5)(6)(7)(8)</sup> e ambientais<sup>(5)(6)(8)</sup>. As caracterizações físicas abordaram ensaios de granulometria, massa específica e determinação dos limites de Atterberg (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade). Alguns dos resultados apresentados se encontram resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais.**

Materiais	Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	2,664 - 3,996	Não Líquido	Não Plástico	Não Plástico
Solo Laterítico	2,653 - 3,018	43	29	14
Solo Residual	2,510 - 2,556	40	Não Plástico	Não Plástico
Misturas Solo-Rejeito	2,625 - 3,213	Não Líquido	Não Plástico	Não Plástico

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

As caracterizações químicas foram realizadas através de ensaios de fluorescência de raios-X e de difração de raios-X. Esses ensaios contribuem para a identificação dos constituintes do solo e do rejeito, podendo, assim, explicar o comportamento das amostras avaliadas. Em geral, os resultados para as caracterizações químicas dos rejeitos de minério de ferro, apresentaram maiores quantidades de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), quartzo (SiO<sub>2</sub>), caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) e gipsita (Al(OH)<sub>3</sub>).



As caracterizações mecânicas compreenderam ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR), expansão e módulo de resiliência. Para a classe II e a classe III foram realizados, também, ensaios de compressão simples, absorção de água e durabilidade. Esses ensaios são fundamentais para compreender o comportamento estrutural dos materiais (mistura de rejeito com solo) no pavimento e auxiliar no dimensionamento por parte dos projetistas. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 4 a 7.

Por último, as caracterizações ambientais consistiram na verificação do rejeito de minério de ferro de acordo com as normas: NBR 10004/04 – Resíduos Sólidos – Classificação, NBR 10005/04 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, e NBR 10006/04 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Em função dos resultados encontrados, Peixoto (2006)<sup>(6)</sup> e Bastos (2013)<sup>(6)</sup> classificaram o rejeito como material classe II A – não perigoso e não inerte. Entretanto, Galhardo (2015)<sup>(5)</sup> classificou o material como classe II B – não perigoso e inerte.

**Tabela 4 - Resultados dos ensaios de compactação dos materiais.**

Mistura	Proctor	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm³)
Rejeito	Normal	9,20 - 14,50	2,22 - 2,58
	Intermediário	9,26 - 16,10	1,96 - 2,60
	Modificado	10,10 - 10,46	2,53 - 2,75
Solo Laterítico	Modificado	18,18	2,13
Solo Residual	Normal	9,76	2,02
	Intermediário	9,59 - 20,50	1,69 - 2,08
	Modificado	8,86	2,11
Misturas com Solo Laterítico	Intermediário	11,70 - 13,40	2,01 - 2,09
	Modificado	12,50 - 16,50	2,15 - 2,20
Misturas com Solo Residual	Normal	9,88 - 10,27	2,11 - 2,34
	Intermediário	9,07 - 19,20	1,77 - 2,40
	Modificado	8,07 - 8,70	2,25 - 2,52
Misturas com Cimento	Intermediário	12,20 - 14,20	2,22 - 2,41
Misturas com Cal	Intermediário	12,20 - 16,00	2,16 - 2,41
Misturas com Escória (Quimicamente)	Intermediário	12,20 - 14,40	2,27 - 2,41
Misturas com Escória (Granulometricamente)	Intermediário	7,40 - 11,40	2,50 - 2,63

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

**Tabela 5 - Resultados dos ensaios de CBR e expansão.**

Mistura	Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)			Expansão (%)
	Energia Normal	Energia Intermediária	Energia Modificada	
Rejeito	9,0 - 23,5	19,4 - 40,8	37,2 - 53,0	<0,40
Solo Laterítico	-	-	53,7	0,00
Solo Residual	-	1,4 - 16,5	25,0	0,12 - 6,10
Misturas com Solo Laterítico	-	46,5	44,2 - 90,8	0,00
Misturas com Solo Residual	-	14,7 - 30,5	23,7 - 57,7	0,04 - 3,90
Misturas com Cimento	-	45,0 - 180,0	-	<0,30
Misturas com Cal	-	38,0 - 32,0	-	<0,32
Misturas com Escória (Quimicamente)	-	28,0 - 47,0	-	<0,36
Misturas com Escória (Granulometricamente)	-	52,0 - 85,0	-	<0,11

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).



**Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.**

Compressão não confinada - Cura em câmara úmida – 7 dias	
Mistura	Resistência (MPa)
Rejeito	0
5% Cimento	1,07 - 1,44
10% Cal	0,79
10% Escória (Quimicamente)	0
50% Escória (Granulometricamente)	0,24
70% Escória (Granulometricamente)	0,30

Fonte: ANTT (2018); DANTAS (2015); GALHARDO (2015); BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

**Tabela 7 - Resultados dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem.**

Durabilidade por molhagem e secagem	
Mistura	Perda de Massa
Rejeito	100%
5% Cimento	20% - 24%
10% Cal	29%
Escória (Granulometricamente)	100%

Fonte: BASTOS (2013); CAMPANHA (2011); PEIXOTO (2006).

A partir dos resultados apresentados nas tabelas 4 a 7, é possível concluir que a aplicação de rejeito puro e misturas de escória e rejeito, estabilizados granulometricamente, é inviável devido à perda de massa de 100% nos ensaios de durabilidade<sup>(6)</sup>. Os ensaios de CBR apresentaram valores interessantes, principalmente para misturas de rejeito e cimento, nas quais os valores de CBR variaram entre 45% e 180%<sup>(6)</sup>. Esses resultados apresentam valores maiores que o mínimo, de 30%, estabelecido pelo DNIT<sup>(9)(10)</sup>, para misturas de solo melhorado com cimento para camadas de sub-base. Para a utilização como camada de base, apenas poucos materiais atenderam o mínimo recomendado de CBR  $\geq 80\%$ <sup>(11)</sup>. Os ensaios de expansão também foram satisfatórios e atenderam as recomendações exigidas para a utilização da mistura como camada de base (expansão máxima de 0,5%) e sub-base (expansão máxima de 1%).

Analisando a resistência à compressão do solo-cimento<sup>(6)</sup>, os resultados dos ensaios apresentaram valores inferiores aos recomendados pelo DNIT<sup>(9)</sup> para resistência mínima aos 7 dias que deve ser entre 1,4 e 2,1 MPa para que a mistura possa ser utilizada como camada de sub-base.

### 2.1.2. Misturas de Classes IV e V

Os estudos relacionados às classes IV<sup>(8)(12)(13)</sup> e V<sup>(8)(14)(15)(16)(17)</sup> (produção de concreto para pavimentação e produção de blocos intertravados para pavimentação, respectivamente) tiveram como objetivo a utilização dos resíduos de minério de ferro como um possível material para a substituição da areia natural, para a produção de concreto. No caso da classe IV, o concreto pode ser empregado em camadas de base e revestimento de pavimentos rígidos, enquanto que para a



classe V pode ser usado apenas em camadas de revestimento. As tabelas 8 e 9 apresentam as proporções de materiais estudadas para a produção de concreto (classe IV) e piso intertravado (classe V), respectivamente.

**Tabela 8 - Proporções de materiais – Classe IV.**

Classe IV	
% de Rejeito	% de Areia
5%	95%
10%	90%
20%	80%
40%	60%
50%	50%
60%	40%
80%	20%
100%	0%

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), PANDITHARADHYA (2017).

**Tabela 9 - Proporções de materiais – Classe V.**

Classe V			
% de Rejeito	% de Areia	% de Pó de Pedra	% de Brita 0
10%	90%	-	-
20%	80%	-	-
50%	50%	-	-
50%	25%	25%	-
75%	25%	-	-
75%	-	25%	-
75%	75%	-	25%
80%	20%	-	-
90%	10%	-	-
100%	-	-	-

Fonte: PEIXOTO (2006); COSTA (2009), SANT'ANA FILHO (2013), GUERRA (2014), RAVI KUMAR (2012).

Os ensaios realizados para as classes IV e V são, em geral, diferentes dos ensaios realizados para as classes I, II e III, uma vez que o material é diferente e a finalidade dele também. Para a caracterização mecânica, foram realizados ensaios de compressão, flexão, durabilidade, absorção de água, retração. Alguns dos resultados são apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

**Tabela 10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.**

Compressão simples (MPa) – 28 dias	
Mistura	Resistência
Concreto C30 5%	55,0
Concreto C30 10%	63,0
Concreto C30 20%	49,3
Concreto C30 40%	50,3
Concreto C30 50%	52,0
Concreto C30 60%	41,6
Concreto C30 80%	41,1
Concreto C30 100%	33,8
Piso Intertravado 10% - 80%	34,8 - 62,4
Piso Intertravado Adição 5% - 25%	24,0 - 35,2

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), PANDITHARADHYA (2017), COSTA (2009), SANT'ANA FILHO (2013), GUERRA (2014), RAVI KUMAR (2012).



**Tabela 11 - Resultados dos ensaios de flexão simples.**

Flexão simples (MPa) – 28 dias	
Mistura	Resistência
Concreto C30 5%	4,0
Concreto C30 10%	4,5
Concreto C30 20%	3,7
Concreto C30 40%	3,5
Concreto C30 50%	3,9
Concreto C30 60%	2,8
Concreto C30 80%	2,0
Concreto C30 100%	1,4

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), PANDITHARADHYA (2017)

**Tabela 12 - Resultados dos ensaios de absorção.**

Absorção de Água (%)	
Mistura	Absorção
Piso Intertravado 10% - 80%	0,7 - 7,1
Piso Intertravado Adição 5% - 25%	2,4 - 6,8

Fonte: PEIXOTO (2006); CHE (2019), COSTA (2009), GUERRA (2014), RAVI KUMAR (2012).

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 10 e 11 pode-se verificar que o incremento da substituição do agregado natural por rejeito de minério de ferro tende a reduzir as resistências a compressão e a flexão. Para a utilização de placas de concreto como base e revestimento de pavimentos rígidos, é recomendável que a resistência à tração na flexão seja de 4,5 MPa<sup>(9)</sup>. Pode-se perceber que as misturas de concreto com 10% de substituição do agregado natural por rejeito de minério de ferro, atingiu a esta recomendação e foi a mistura com a maior resistência a compressão. Por Peixoto (2006)<sup>(8)</sup>, blocos intertravados com maiores adições de rejeitos de minério de ferro apresentaram menor absorção de água, indicando aumento durabilidade. Entretanto, elevadas quantidades de rejeito de minério de ferro na mistura apresentaram grandes perdas por abrasão. Misturas entre 10% e 50% de rejeito apresentaram os melhores resultados entre absorção de água e abrasão.

Os trabalhos também contaram com caracterizações físicas<sup>(8)(12)(13)(14)(16)(17)</sup>, químicas<sup>(8)(12)(14)(16)(17)</sup> e ambientais<sup>(14)(16)</sup> dos rejeitos de mineração. Os resultados para as caracterizações físicas e químicas foram similares aos apresentados, anteriormente, para as classes I, II e III. Para a classificação ambiental, o autor Guerra (2014)<sup>(16)</sup>, caracterizou o rejeito como um material de classe II A – não perigoso e não inerte. Já Costa (2009)<sup>(14)</sup>, classificou o rejeito como classe II B – não perigoso e inerte.

### 2.1.3. Misturas de Classe VI

O rejeito de minério de ferro também foi avaliado como material alternativo para compor misturas asfálticas para revestimento de pavimentos flexíveis<sup>(18)(19)(20)(21)</sup>. Os estudos compreenderam a



adição do rejeito em ligantes asfálticos e também em misturas asfálticas. Para avaliar os ligantes foram realizados os seguintes ensaios: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e ductilidade. Os ensaios realizados para avaliar as misturas asfálticas foram: módulo de resiliência, fadiga, uniaxial de carga repetida, resistência à tração por compressão diametral e perda por umidade induzida. Alguns resultados dos ensaios realizados são comentados a seguir.

Quando adicionado no ligante asfáltico, os valores de penetração diminuíram com o aumento do teor de rejeito adicionado, enquanto que o ponto de amolecimento aumentou com a incorporação do rejeito. Isso mostra que a adição de rejeito de minério de ferro em ligantes asfálticos aumenta a sua consistência. Os ensaios de ductilidade confirmam esse resultado, onde pode-se observar valores inferiores aos limites mínimos para o asfalto puro, indicando que o material se torna menos dúctil antes da sua ruptura. Além disso, quando analisado em uma mesma temperatura, pode-se verificar que ocorreu um aumento da viscosidade com o uso do rejeito, e, portanto, as temperaturas de usinagem e compactação devem ser mais altas. No caso das misturas asfálticas, a resistência à tração por compressão diametral foi maior nas misturas contendo o rejeito de minério de ferro.

## **2.2. Rejeitos de Bauxita**

A bauxita é o terceiro mineral, em volume, mais produzido pelo Brasil, com cerca de 32 milhões de toneladas anuais<sup>(22)</sup>. Para que a produção de alumínio seja economicamente viável, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) aproveitável<sup>(23)</sup>.

A bauxita é o primeiro elo da cadeia produtiva da indústria de alumínio. A partir da purificação da bauxita são produzidos os óxidos de alumínio (alumina), e, destes, são produzidos os alumínio metálicos. São necessários 5 a 7 toneladas de bauxita para produzir 2 toneladas de alumina (óxido de alumínio), que se convertem em 1 tonelada de alumínio<sup>(23)</sup>.

Foram estudadas 5 formas de incorporar o rejeito de bauxita em pavimentos:

- Misturas de solo-rejeito, com dosagens de 60% solo e 40% rejeito<sup>(24)</sup>.
- Misturas de rejeito estabilizado com 4% de cinzas volantes<sup>(24)</sup>.
- Argamassas com rejeito, em substituição ao cimento, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%<sup>(25)</sup>.
- Rejeito puro, como camada de subleito para pavimentos<sup>(26)</sup>.
- Uso de rejeito de bauxita como agregado graúdo, e realização de misturas estabilizadas com outros rejeitos industriais<sup>(27)</sup>. No oeste da Austrália, os depósitos de bauxita apresentam



elevadas quantidades de quartzo, que gera frações graúdas para o rejeito<sup>(27)</sup>. Esse fenômeno não é usual e, portanto, essa utilização não será levada em consideração para este trabalho.

Foram realizadas caracterizações físicas<sup>(24)(25)(26)</sup>, químicas<sup>(25)(26)</sup> e mecânicas<sup>(24)</sup> para o rejeito de bauxita e para as misturas estudadas. Os ensaios realizados foram: massa específica, limites de Atterberg, granulometria, módulo de elasticidade, compactação e índice de suporte Califórnia (CBR). Alguns dos resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15.

**Tabela 13 - Resultados dos ensaios de caracterização do rejeito de bauxita.**

Mistura	Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	3,33 - 3,95	25 - 37	18 - 33	4 - 7

Fonte: KEHAGIA (2008); ARHIN (2017); DAS (2015)

**Tabela 14 - Resultados dos ensaios de compactação.**

Compactação			
Amostra	Proctor	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm <sup>3</sup> )
Rejeito	Normal	18,5	2,02
Solo - Rejeito (60% - 40%)	Normal	13,1	2,05
Rejeito - 4% Cinza Volante	Normal	21,2	1,68

Fonte: KEHAGIA (2008); DAS (2015)

**Tabela 15 - Resultados dos ensaios de CBR.**

Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)	
Misturas	Energia Normal
Rejeito	27
Solo - Rejeito (60% - 40%)	34
Rejeito - 4% Cinza Volante	19

Fonte: KEHAGIA (2008); DAS (2015)

Para os ensaios de caracterização química, foram realizadas análises de espectrometria de fluorescência de raios-X e de difração de raios-X. Os resultados apresentaram maiores concentrações para hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cal (CaO), quartzo (SiO<sub>2</sub>), óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) e óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>).

A verificação da viabilidade técnica da utilização de rejeitos de bauxita em pavimentos carece de mais estudos. Os ensaios de CBR foram realizados com energia do Proctor Normal (energia inferior à recomendada pelo DNIT) e apresentaram valores próximos, e até mesmo superiores (para o caso de mistura de solo-rejeito), para a utilização dessas misturas como camada de sub-base. Ensaios de CBR com energia intermediária, expansão, ensaios de compressão, flexão e durabilidade são necessários para avaliar o comportamento dessas misturas.

Outras possibilidades de pesquisas futuras é o estudo de misturas estabilizadas, placas de concreto para pavimentos rígidos e a incorporação do rejeito em misturas asfálticas.



### 2.3. Rejeito de Minério de Cobre

O cobre ocupa a oitava posição da produção anual, em volume, de bens minerais no Brasil, com 219.000 toneladas anuais<sup>(22)</sup>.

O rejeito de cobre foi estudado em 2 situações:

- Em mistura de solo-rejeito, para compor camadas de base e sub-base de pavimentos<sup>(28)</sup>;
- Em adição a misturas asfálticas, para camadas de revestimento<sup>(29)</sup>.

Para a mistura de solo-rejeito, foi utilizado um solo laterítico, com proporções de 50% solo e 50% rejeito, e 70% solo e 30% rejeito. Neste estudo foram realizadas caracterizações físicas<sup>(28)(29)</sup>, químicas<sup>(28)(29)</sup>, ambientais<sup>(29)</sup> e mecânicas<sup>(28)(29)</sup> do rejeito e das misturas. Para as caracterizações físicas, foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos grãos. Esses resultados são apresentados na tabela 16. Os ensaios mecânicos constituíram de ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR), expansão e módulo de resiliência. Alguns dos resultados apresentados são resumidos nas tabelas 17 e 18.

**Tabela 16 - Resultados dos ensaios de caracterização das misturas com rejeito de minério de cobre.**

Mistura	Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	2,895	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico
Solo - Rejeito (50% - 50%)	2,755	24,2	9,1	15,1
Solo - Rejeito (70% - 30%)	2,660	16,5	3,1	13,4

Fonte: SOUSA (2017); KATO (2016)

**Tabela 17 - Resultados dos ensaios de compactação.**

Compactação			
Amostra	Proctor	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm <sup>3</sup> )
Rejeito	Intermediário	11,5	1,91
Solo - Rejeito (50% - 50%)	Intermediário	9,5 - 12,0	2,01 - 2,12
Solo - Rejeito (70% - 30%)	Intermediário	7,9	2,15

Fonte: SOUSA (2017).

**Tabela 18 - Resultados dos ensaios de CBR.**

Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)		Expansão (%)
Misturas	Energia Intermediária	
Solo - Rejeito (50% - 50%)	21,8	0,75
Solo - Rejeito (70% - 30%)	51,9	0,28

Fonte: SOUSA (2017).

A caracterização química foi realizada através dos ensaios de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. A difração de raios X indicou a presença, no rejeito de minério de cobre, dos seguintes compostos: hidróxido de silicato alumínio e magnésio; quartzo; sulfato alumínio potássio; hidróxido duplo de ferro molibdênio; hidróxido silicato de magnésio.



A pesquisa relacionada ao uso de minério de cobre em pavimentos também carece de estudos. É possível perceber que o aumento do uso de rejeitos em misturas de solo-rejeito, reduz o limite de liquidez, a umidade ótima e aumenta o peso específico aparente seco. Entretanto, há uma grande redução do valor do CBR e um aumento da expansão. Para a mistura de 70% solo e 30% rejeito, o resultado do ensaio de CBR e expansão adequa a mistura como uma camada de sub-base.

A realização de outros ensaios, como compressão, flexão e durabilidade, e novas misturas, como misturas cimentícias, asfálticas e granulares, utilizando o rejeito de minério de cobre, são necessários para enriquecer a pesquisa, compreender o comportamento do material e a sua viabilidade técnica como um material alternativo para uso em pavimentação.

## 2.4. Rejeito de Minério de Tungstênio (Scheelita)

A scheelita é um dos principais minérios extraídos para a obtenção de tungstênio. Apesar da exploração brasileira do tungstênio não ser muito expressiva, em âmbito mundial, para efeitos regionais, o reaproveitamento dos rejeitos de minério de tungstênio em pavimentação, pode trazer muitos benefícios ambientais e econômicos. As principais jazidas brasileiras de tungstênio se localizam no estado do Rio Grande do Norte <sup>(1)</sup>.

O rejeito de scheelita foi estudado para as seguintes finalidades:

- Como material de substituição de agregado miúdo na produção de concretos <sup>(30)</sup>;
- Como misturas de solo-rejeito e cimento-rejeito <sup>(31)</sup>

Foram realizadas caracterizações físicas<sup>(30)(31)</sup>, químicas<sup>(31)</sup> e mecânicas<sup>(30)(31)</sup> para o rejeito de scheelita. As caracterizações físicas englobaram análises granulométricas, determinação dos Limites de Atterberg e da massa específica. Alguns dos resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de caracterização das misturas com rejeito de scheelita.

Mistura	Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)		
		LL	LP	IP
Rejeito	3,15	Não Plástico	Não Plástico	Não Plástico

Fonte: BATISTA (2018); LINHARES (2014).

A caracterização química indicou a presença de, principalmente, Cal (CaO), Quartzo (SiO<sub>2</sub>), Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Os ensaios mecânicos compreenderam ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) para as misturas de solo-rejeito e cimento-rejeito. Para o concreto com rejeito, foram realizados ensaios de resistência a compressão, tração na flexão e tração por compressão diametral. Os resultados são apresentados nas Tabelas 20 e 21.



Tabela 20 - Resultados dos ensaios de CBR.

Índice de Suporte Califórnia - CBR (%)	
Misturas	Energia Normal
Rejeito	45,5
Solo - Rejeito (60% - 40%)	28,4
Rejeito - Cimento (99% - 1%)	62,1

Fonte: LINHARES (2014).

Tabela 21: Resultados dos ensaios de resistência dos concretos.

Mistura	Compressão simples (MPa)	Tração por Compressão Diametral (MPa)	Tração na Flexão (MPa)
Concreto Convencional	29,3	3,2	4,2
10% de Rejeito (em substituição)	27,2	2,7	3,5
20% de Rejeito (em substituição)	24,1	2,6	3,3
30% de Rejeito (em substituição)	28,6	2,5	3,2

Fonte: BATISTA (2018).

O rejeito de scheelita apresentou o maior valor de CBR, mesmo utilizando uma menor energia de compactação. Estudos complementares são necessários, mas o rejeito puro apresenta um potencial de aplicação como reforço de subleito e como camada de sub-base. A mistura de rejeito com 1% de cimento apresentou uma melhora significativa do CBR, apontando uma outra alternativa de mistura.

Para o concreto, a substituição do agregado natural pelo rejeito de scheelita tende a reduzir suas resistências. Nenhuma das amostras analisadas na tração na flexão, atingiu o valor recomendado de 4,5 MPa<sup>(9)</sup>. Outras dosagens podem ser avaliadas a fim de atingir a resistência desejada. Ensaio de compressão, flexão, durabilidade e ensaios ambientais são necessários para o estudo de viabilidade técnica desse rejeito.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de rejeitos de mineração em pavimentos possui uma vasta aplicabilidade e, portanto, um amplo campo de estudo, englobando misturas asfálticas, misturas cimentícias, pavimentos intertravados e misturas granulares para compor camadas de base sub-base e reforço de subleito. A pesquisa relacionada a rejeito de minério de ferro foi aquela que se encontrou em um estado mais avançado, abrangendo um maior número de possibilidades de usos e, também, um maior número de ensaios realizados. Dessa forma, possibilita um maior entendimento do comportamento e do desempenho das misturas com a incorporação do rejeito. Os rejeitos de bauxita, minério de cobre e tungstênio apresentam potencial de aplicação, porém necessitam de estudos complementares.

Vale ressaltar, também, que a distância entre o local de extração dos minérios, ou do local de beneficiamento destes, e o local de aplicação dos rejeitos pode influenciar nos custos de transporte, assim como o estado do material (líquido ou sólido), afetando a viabilidade do uso do rejeito. Outra



observação importante é que podem existir significativas diferenças das propriedades desses rejeitos dependendo do local de extração, por isso, essas propriedades devem ser estudadas antes de sua aplicação. Os valores apresentados neste artigo servem de indicadores para futuros estudos.

O uso dos rejeitos de mineração em obras de pavimentação pode, possivelmente, reduzir o consumo de material, promover uma nova destinação para os rejeitos, reduzir impactos ambientais e reduzir os custos das obras. Com isso, o estudo da utilização desse material alternativo é interessante e necessário para promover um desenvolvimento sustentável no país.

#### 4. REFERÊNCIAS

1. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Sumário Mineral**. 2016.
2. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. 2012.
3. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Estudo da Viabilidade Técnica de Utilização de Rejeitos de Minério de Ferro em Pavimentos Rodoviários**. 2018.
4. DANTAS, A. A. N. **Caracterização dos resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 88f, 2015.
5. GALHARDO, D. C. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 186f, 2015.
6. BASTOS, L. A. de C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 97f. 2013.
7. CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 86f. .2011.
8. PEIXOTO, R. F. *et. al.* **Utilização de rejeitos de barragens de minério de ferro na construção civil**. Relatório de Pesquisa – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 56f. 2006.
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 2005.
10. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço**. DNIT 140/2010 – ES. 2010.
11. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço**. DNIT 142/2010 – ES. 2010.
12. CHE, T. K. *et. al.* **Utilization of iron tailings as fine aggregates in low-grade cement concrete pavement**. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 479 – Dalian, China, 2019.
13. PANDITHARADHYA, B. J., *et. al.* **A study of utilization of iron ore tailings as partial replacement for fine aggregates in the construction of rigid pavements**. In: *National Conference on Roads and Transport* – Karnataka, Índia, 2017.



14. COSTA, A. V. **Utilização do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 155f. 2009.
15. SANT'ANA FILHO J. N. de. **Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos intertravados de uso em pátios industriais e alto tráfego.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 121f. 2013.
16. GUERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro *pellet feed* em pavimentos de blocos intertravados de concreto.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 124f. 2014.
17. RAVI KUMAR, C. M. *et. al.* **A study of utilization of iron ore tailings as partial replacement for fine aggregates in the construction of rigid pavements.** *International Journal of Earth Sciences and Engineering* – vol. 5, p. 501-504, 2012.
18. SILVA, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 205f. 2017.
19. ARÊDES, M. L. A. de **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 147f. 2016.
20. APAZA, F. R. *et. al.* **Estudo sobre a utilização de resíduo de minério de ferro em microrrevestimento asfáltico.** *Revista Transportes – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes* – 2016.
21. MOURÃO B. G. *et. al.* **Ligante Asfáltico modificado com rejeito de mineração de ferro.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – 2016.
22. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração.** 2015.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Bauxita no Brasil: Mineração Responsável e Competitividade.** 2017.
24. KEHAGIA, F. **An innovative geotechnical application of bauxite residue.** *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* – vol. 13, 2008.
25. ARHIN, D. D. *et. al.* **Awaso bauxite red mud-cement based composites: characterisation for pavement applications.** *Case Studies in Construction Materials* – vol. 7, p. 45-55, 2017.
26. DAS, S. K., ROUT, S., ALAM, S. **Characterization of red mud as a subgrade construction material.** *3<sup>rd</sup> Conference of Transportation Research Group of India* – 2015.
27. JITSANGIAM, P., NIKRAZ, H. **Coarse bauxite residue for roadway construction materials.** *International Journal of Pavement Engineering* – vol. 14, p. 265-273, 2012.
28. SOUSA, J. G. M. de **Potencial para a utilização do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado em pavimentação.** Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 122f. 2017.
29. KATO, R. B. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico.** Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 147f. 2016.
30. BATISTA, L. S. *et. al.* **Análise da incorporação de resíduo de scheelita em concreto alternativo para fins de pavimentação.** IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental – 2018.
31. LINHARES, A. de S., SILVA, B. T. A. da **Aplicação do rejeito da scheelita em camadas granulares de pavimentos.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – 2014.



## AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM ARGILAS CALCINADAS PASSÍVEIS DE USO EM LC<sup>3</sup>

**DANIELI, Sarah<sup>(1)</sup>; SILVA, Micael Rubens Cardoso da<sup>(2)</sup>; MALACARNE, Camila Salvi<sup>(3)</sup>; MACIEL, Vinícius Gonçalves<sup>(4)</sup>; KIRCHHEIM, Ana Paula<sup>(5)</sup>**

(1) Graduanda em Engenharia Civil, UFRGS - sarah.danielishd@gmail.com; (2) Graduando em Engenharia Civil, UFPA - micaelrubens@gmail.com; (3) Doutoranda em Engenharia Civil, PPGCI/NORIE, UFRGS - camila.smalacarne@gmail.com; (4) Pesquisador Pós-doutorado, DECIV, PPGCI/NORIE, UFRGS - vinicius.maciell@gmail.com; (5) Professora Doutora, DECIV, PPGCI/NORIE, UFRGS - anapaula.k@gmail.com

### RESUMO

A procura por ligantes com características equivalentes ao cimento Portland justifica-se na intenção de reduzir o impacto ambiental causado pela indústria cimenteira. Neste contexto, o chamado cimento LC<sup>3</sup> (*limestone calcined clay cement*) é considerado mais ecológico, pois prevê uma substituição de pelo menos 50% do clínquer - principal responsável pelas emissões de poluentes atmosféricos na produção do cimento Portland. Um dos materiais incorporados é a argila calcinada, que adquire propriedades pozolânicas diante de ativação térmica a uma temperatura inferior à da produção do clínquer. Neste estudo foram avaliadas duas argilas passíveis de utilização em LC<sup>3</sup>: uma natural oriunda de jazida e um resíduo da extração de carvão. O objetivo foi analisar o impacto ambiental quando considerada a diferença entre o resíduo e o material natural e seus processos de beneficiamento para uso em cimentos LC<sup>3</sup>. A metodologia utilizada foi a Avaliação de Ciclo de Vida, com ênfase no potencial de aquecimento global. Também foram avaliadas as propriedades químicas e pozolânicas, para identificar qual argila possui as propriedades mais interessantes para fins de utilização em LC<sup>3</sup>. Os resultados apontam menor impacto ambiental do resíduo, mas melhores propriedades da argila natural, ainda que o resíduo atenda aos requisitos mínimos normativos.

**Palavras-chave:** Análise de Ciclo de Vida, Argila Calcinada, Resíduo, LC<sup>3</sup>.

## LIFE CYCLE ASSESSMENT OF CALCINED CLAYS AVAILABLE OF USE IN LC<sup>3</sup>

### ABSTRACT

The search for binders with characteristics equivalent to Portland cement is justified in the intention of reducing the environmental impact caused by the cement industry. Therefore, the cement known as LC<sup>3</sup> (*limestone calcined clay cement*) is considered greener, because it predicts a replacement of at least 50% of clinker, main responsible for atmospheric pollutants emissions in the Portland cement production. One of the incorporated materials is the calcined clay, which acquires pozzolanic properties after thermal activation at a lower temperature than the clinker production. In this study, two types of clays that could be used in LC<sup>3</sup> were evaluated: one natural from a deposit and a residue from the extraction of coal. The purpose was to analyze the difference between residue and natural material and their benefit processes for use in LC<sup>3</sup>. The methodology used was the Life Cycle Assessment, with emphasis on global warming potential. It was also evaluated the chemical and pozzolanic properties, aiming to identify which clay has the most interesting properties for use in LC<sup>3</sup>. Results point to lower environmental impact of the residue but better characterization of the natural clay, although the residue meets the normative requirements.

**Key-words:** Clay waste, Calcined Clay, Cement, LC<sup>3</sup>



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira tem enfrentado grandes desafios com relação à sua massiva emissão de poluentes atmosféricos e grande consumo de recursos naturais e energéticos, sendo considerada a terceira maior consumidora mundial de energia e responsável 5% de toda a emissão mundial em 2010<sup>(1)</sup>. Tal situação tende a se agravar nos próximos anos em virtude da crescente utilização mundial de cimento<sup>(2)</sup>. Uma alternativa bastante eficiente para conter tais emissões é a substituição do clínquer por Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs) Entretanto, uma restrição a uma maior utilização desta alternativa é imposta pelo suprimento limitado de materiais a serem utilizados como adição<sup>(3)</sup>.

Apesar das adições no cimento Portland mais comuns no Brasil, como a escória de alto forno e a cinza volante, serem permitidas em grandes porcentagens pela NBR 16697<sup>(4)</sup>, Abrão<sup>(5)</sup> mostra que suas disponibilidades não suprem a quantidade necessária e sua qualidade pode ser variável. No caso da cinza volante, que é a adição mais comum no sul do Brasil, a produção de energia termoelétrica a partir da queima do carvão não é considerada sustentável e vem sendo questionada em diversos países<sup>(6)</sup>. Por outro lado, o fíler calcário e as argilas possuem elevada disponibilidade se comparado à produção de cimento Portland, tanto a nível global<sup>(3)</sup> quanto nacional<sup>(5)</sup>.

Considerando a disponibilidade destes dois materiais, um grupo suíço-cubano investigou a possibilidade de produzir materiais pozolânicos usando argilas com baixo teor de caulinita e a produção de cimentos ternários compostos de clínquer, argila calcinada e calcário, com substituição do clínquer superior a 50%<sup>(7)</sup>. Este cimento, denominado de LC<sup>3</sup> (*Limestone Calcined Clay Cement*), tem como princípio uma reação sinérgica entre o calcário e a argila calcinada, uma vez que a presença de fontes extras de alumina do cimento, com a adição da argila calcinada, permite utilizar maiores quantidades de calcário reativo na mistura.

Acredita-se que, no cenário atual, o cimento LC<sup>3</sup> seja uma boa alternativa para reduções nas emissões de GEE pela indústria cimenteira, já que apresenta potencial para rápida incorporação pelo mercado e uma vasta disponibilidade de matéria prima. Levando isso em consideração, pode-se pensar na produção cimentos mais amigáveis ambientalmente no contexto brasileiro com o uso de recursos e matérias-primas locais, visto que o modal transporte pode ser um aspecto muito impactante quando se avalia o ciclo de vida dos materiais envolvidos na produção de insumos.



O Rio Grande do Sul (RS) conta com expressivas reservas de argila<sup>(8)</sup>. Assim, neste estudo serão avaliados dois tipos de argilas gaúchas passíveis de serem utilizadas em LC<sup>3</sup>. Uma delas é uma argila natural (AN) disponível em abundância e predominantemente utilizada, ainda que em pequena escala, na indústria cerâmica de revestimentos (pisos e azulejos) e esmaltes. A outra é um resíduo (AR) resultante da extração de carvão mineral que está disponível em grande volume e não possui nenhuma finalidade atualmente. Sua camada sobreposta ao carvão mineral é retirada e armazenada em pilhas a céu aberto, comprometendo o ambiente e se tornando um passivo ambiental.

Dornelles et al.<sup>(9)</sup> analisou estas mesmas argilas e verificou que ambas se apresentam como fonte de metacaulinita após serem ativadas termicamente e, também, que as argilas com maior teor de caulinita possuem maior reatividade pozolânica e maior índice de desempenho quando adicionadas à cimentos Portland. Malacarne<sup>(10)</sup> também estudou essas argilas, utilizando-as para produção de cimentos LC<sup>3</sup> na proporção de 30%. Seus estudos concluem que apesar de os cimentos com AN terem apresentado resistências mecânicas superiores, os com AR também atenderam às resistências especificadas pela NBR 16697<sup>(4)</sup> para Cimentos Portland Pozolânicos (CP IV).

No entanto, estes materiais ainda carecem de estudos mais aprofundados para fornecer uma alternativa viável tecnologicamente para sua utilização em larga escala. Além de caracterizá-los e avaliá-los para uso em cimentos faz-se necessário avaliá-los quanto à sua viabilidade técnica e potencial de sustentabilidade. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia internacionalmente consagrada na avaliação ambiental de produtos e uma ferramenta de ampla aplicabilidade no setor da construção civil. Ela consiste na compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema, permitindo que se avalie seu desempenho ambiental.

O objetivo deste estudo, portanto, foi caracterizar as duas argilas citadas acerca de sua atividade pozolânica e o teor de caulinita, uma vez que tais fatores podem indicar o provável desempenho mecânico destes materiais quando incorporados em composições de LC<sup>3</sup>. Em seguida, conduzir uma ACV do berço-ao-portão para avaliar o desempenho ambiental das argilas quando beneficiados para uso em LC<sup>3</sup>. Foram considerados os processos de extração, transporte (em dois cenários distintos) e beneficiamento para uso em LC<sup>3</sup> (calcinação, trituração e moagem), com ênfase na avaliação da categoria de impacto potencial de aquecimento global.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Processo de beneficiamento em escala laboratorial

Os processos laboratoriais descritos neste item serviram de base para analisar os processos de beneficiamento aos quais as argilas seriam supostamente submetidas em um contexto industrial, bem como para fonte de dados para o inventário da ACV.

A AN foi inicialmente homogeneizada, quarteada e seca em estufa a 100 °C para eliminar a água livre, até apresentar constância de massa. Na sequência as aglomerações (Figura 1a) foram desfeitas com almofariz e pistilo até que toda argila passasse em uma peneira com abertura de 0,6 mm (30 mesh), procedimento adotado para proporcionar uma calcinação uniforme ao material<sup>(11)</sup>.

A AR foi recebida na forma de blocos com dimensões de até 120 mm (Figura 1b). Para reduzir o tamanho das partículas, o material foi processado até que passasse em uma peneira com 0,6 mm de abertura (30 mesh) em um britador de mandíbula com abertura fixa em três milímetros. Posteriormente foi homogeneizado, quarteado e seco em estufa a 100 °C.

Figura 1: (a) argila *in natura*, (b) argilito *in natura*.



Posteriormente os materiais foram submetidos à ativação térmica com o intuito de torná-los reativos. A temperatura de calcinação adotada foi baseada na bibliografia e nos resultados do ensaio de termogravimetria (TGA), que indicam que a perda de massa das argilas se encerra em torno dos 700°C. A partir desse resultado foi escolhida a temperatura de 750 °C. A margem superior de 50 °C foi adotada para garantir uma completa transformação da caulinita, já que a quantidade de material utilizada no ensaio de TGA é de 10 mg enquanto na mufla são calcinados 600 gramas por vez.



A calcinação foi feita em uma mufla estática Sanchis, modelo DTT, com volume interno de 0,12m<sup>3</sup> e temperatura máxima de 1200 °C. As argilas foram dispostas sobre tijolo refratário em uma pilha de pequena altura para garantir uma calcinação homogênea. A taxa de aquecimento foi fixada em 10 °C/min e o patamar na temperatura máxima foi de 60 min. Ao fim do ciclo foi imposto ao material um choque térmico com intuito de preservar a amorficidade gerada durante a calcinação.

Após os materiais foram moídos para ajuste da finura, a fim de se obter um d<sub>90</sub> menor ou igual a 25, com um moinho de bolas Servitech, modelo CT-242, com jarro de porcelana com capacidade de 1000 ml e rotação de 380 rpm. Foram utilizados em média 280 ml de material por moagem e carga moedora de 273 esferas de alumina com diâmetro de 15±5 mm. O tempo de moagem considerado adequado após testes foi de 10 minutos para a AN e 40 minutos para a AR.

## 2.2 Técnicas de caracterização das argilas

As análises química e mineralógica do material foram realizadas através dos ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), com as argilas *in natura* e termogravimetria (TGA), com o material *in natura* e após a calcinação. O teor de caulinita nas argilas e a temperatura adequada para calcinação puderam ser estimados através da TGA. A FRX foi feita no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios-X por comprimento de onda Shimadzu, XRF 1800, entre o número de onda de 400 a 4000 cm<sup>-1</sup>. As TGAs foram conduzidas em um equipamento Shimadzu DTG-60H, no Laboratório de Catálise e Materiais (LABCAT) do Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia (UFBA). A atmosfera utilizada foi fluxo de nitrogênio a uma taxa de 50 ml/min. A quantidade de material ensaiada foi 10 mg, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Em cada ensaio a amostra foi mantida a 35 °C por uma hora para garantir sua secagem, sendo depois aquecida até 1000 °C.

Para avaliar o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) dos materiais após a calcinação utilizou-se o Método Chapelle modificado, orientado pela NBR 15895<sup>(12)</sup>. Esse método é uma técnica direta de avaliação da reatividade de um material através da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado quando 1 g de material é colocado em suspensão aquosa com óxido de cálcio (CaO) e submetido a um banho térmico a temperatura de 90 ± 5 °C pelo período de 16 ± 1 hora.

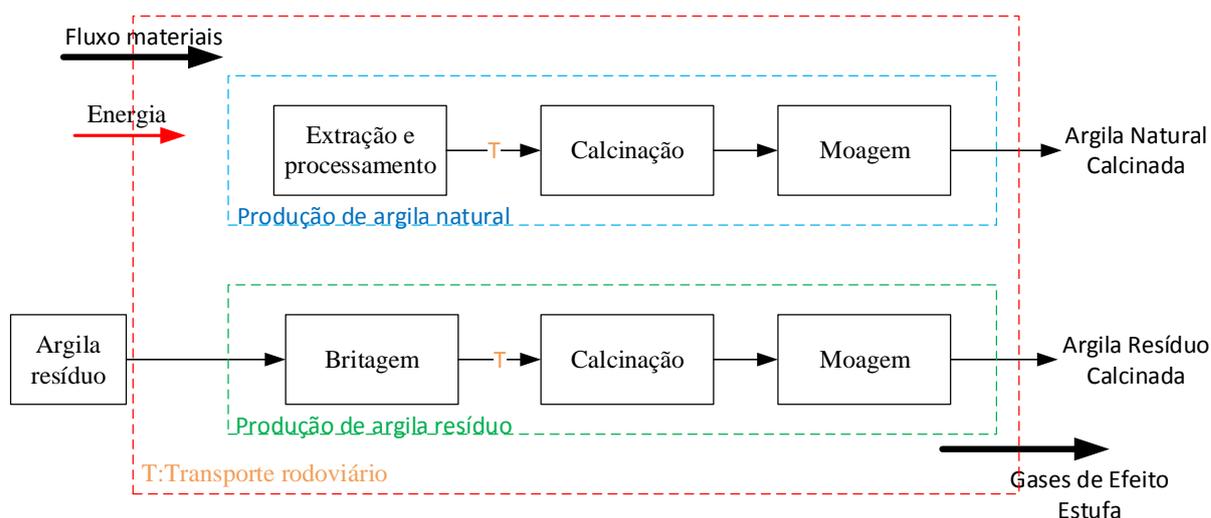


## 2.3 Avaliação do Ciclo de Vida

### 2.3.1 Definição do objetivo e escopo

A ACV foi conduzida com objetivo de comparar o desempenho ambiental da produção das argilas para fins de utilização em LC<sup>3</sup>. A metodologia foi empregada para avaliar a produção dos sistemas do "berço ao portão" da fábrica, ou seja, da extração das matérias primas até a produção das argilas calcinadas. A unidade funcional (UF) utilizada é a produção de 1 kg de argila calcinada. As fronteiras do sistema estão descritas na Figura 2. Processos e fluxos elementares associados à obtenção da AR foram negligenciados, já que o referido material é um resíduo da geração de energia em usinas termelétricas e não possui valor comercial até o momento.

Figura 2: Fronteiras do sistema de produção dos cimentos LC<sup>3</sup>.



O método de caracterização de impactos IPPC 2013 v.1.03 – 100 anos foi empregado para avaliar a categoria de impacto potencial de aquecimento global. A modelagem foi realizada no software Simapro versão Faculty v.9 utilizando a base de dados da Ecoinvent v.3.0. Dados primários foram obtidos a partir de experimentos em laboratório e dados secundários disponíveis na literatura foram empregados para construção dos Inventários de Ciclo de Vida (ICVs).

A matriz energética brasileira disponível na base de dados Ecoinvent foi considerada para todos os processos de obtenção e beneficiamento da AN e para o estágio de calcinação das argilas. Para o transporte foi considerado um caminhão com capacidade de 10 a 20 toneladas equipado com motor EURO 3.



### 2.3.2 Construção do Inventário do Ciclo de Vida

Os métodos de beneficiamento utilizados em escala laboratorial foram adaptados para a escala industrial a partir de considerações e dados disponíveis na literatura. Para a etapa de britagem da AR e moagem de ambas as argilas foram considerados processos semelhantes empregados no beneficiamento de calcário e reportados por Ecoinvent<sup>(13)</sup>. Assim, foi utilizado um consumo de energia elétrica de  $5,1 \times 10^4$  kWh/kg de argila para trituração e  $8,98 \times 10^{-2}$  MJ/kg de argila para moagem.

A energia para calcinação foi calculada considerando o método reportado por Pillai et al.<sup>(14)</sup>. Segundo o autor, a energia necessária para calcinação de argilas é de 2,6 MJ/kg de argila e a energia elétrica para o forno rotativo é 0,04 kWh/kg de argila. Cabe salientar que as argilas encontravam-se em estado úmido quando foram transportadas até o local de beneficiamento. A umidade de ambas as argilas foi determinada em laboratório utilizando uma estufa a 100°C e aproximadamente 800 gramas de amostra. A AN apresentou 17,67% de umidade e a AR apenas 2,26%. Considerou-se para efeitos de consumo de energia para calcinação as argilas secas, negligenciando-se a energia demandada para evaporação da água, uma vez que o forno trabalha a temperaturas muito superiores à necessária para perda da umidade. No entanto, os fluxos mássicos relacionados a esta etapa foram considerados. Os resultados das TGAs das argilas foram empregados para estimar seu teor de desidroxilação, sendo tal dado utilizado na determinação das perdas no processo de calcinação. Logo, foi considerada uma perda de massa de 12,89% para AN e 6,58% para AR. As emissões da combustão do coque de petróleo foram calculadas a partir BEN<sup>(15)</sup>, considerando um poder calorífico inferior de 8390 kcal/kg do material.

Inicialmente, para efeito de análise dos processos o transporte foi negligenciado e, portanto, uma análise considerando o fluxo de transporte igual a zero foi realizada. Posteriormente foi avaliada a influência do transporte considerando dois cenários distintos. Foram previstas as distâncias entre o local de coleta das argilas e as possíveis localizações das plantas de processamento (Tabela 1). Assim, o cenário A contemplou o melhor cenário, onde a distância entre o local de coleta das argilas e a planta são o menor possível e o Cenário B é o pior cenário, onde há a maior necessidade de deslocamento.

Tabela 1: Distância entre o local de origem das argilas e as possíveis plantas de calcinação

Argilas	Possível localização da planta	
	Cenário A	Cenário B
Argila natural (AN)	147 km	293 km



### 2.3.2 Considerações e Limitações do estudo

Devido às particularidades inerentes a produção de argilas calcinadas alguns dados não estavam disponíveis ou ainda não estão consolidados. Assim, a seguir são apresentadas algumas considerações e limitações consideradas neste estudo:

- Extração da argila natural: foi utilizado um processo disponível por Ecoinvent v3 e adaptado os fluxos energéticos para a matriz energética brasileira;
- Alocação e impacto positivo da AR: foi assumido que a AR obtida como resíduo do processo de mineração de carvão para geração de energia em termoeletrica possui impacto igual a zero. Portanto, não foram realizadas alocação, uma vez que, o referido resíduo não possui valor de mercado. Também não foi considerado nenhum tipo de benefício (impacto positivo) de sua utilização;
- Energia de calcinação: o fator de consumo de energia para calcinação foi considerada como igual para ambas as argilas e obtida a partir de Pillai et al.<sup>(14)</sup>; no entanto, cabe mencionar que o autor estimou a energia a partir da técnica de calorimetria diferencial de varredura para uma amostra de argila com conteúdo de caulinita diferente das empregadas neste estudo;
- Processo de britagem e moagem: as perdas de massa relacionadas ao processo de moagem e britagem foram negligenciadas.
- Energia do forno rotativo, britagem e moagem: foram considerados dados secundários para a demanda de energia por essas fontes e o tipo de combustível utilizado a partir de Ecoinvent<sup>(13)</sup>.
- Pré-secagem: para efeitos de ICV foi considerado um fluxo de pré-secagem das argilas antes da calcinação. Nesta etapa a água presente nas argilas é evaporada. Portanto, não foi considerado um processo específico para esta etapa, assumindo-se que a evaporação da água pode ser realizada em com uma menor demanda de energia quando comparado à etapa de calcinação. Por outro lado, a perda de massa deste processo foi considerada e determinada a partir do programa experimental.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização das argilas

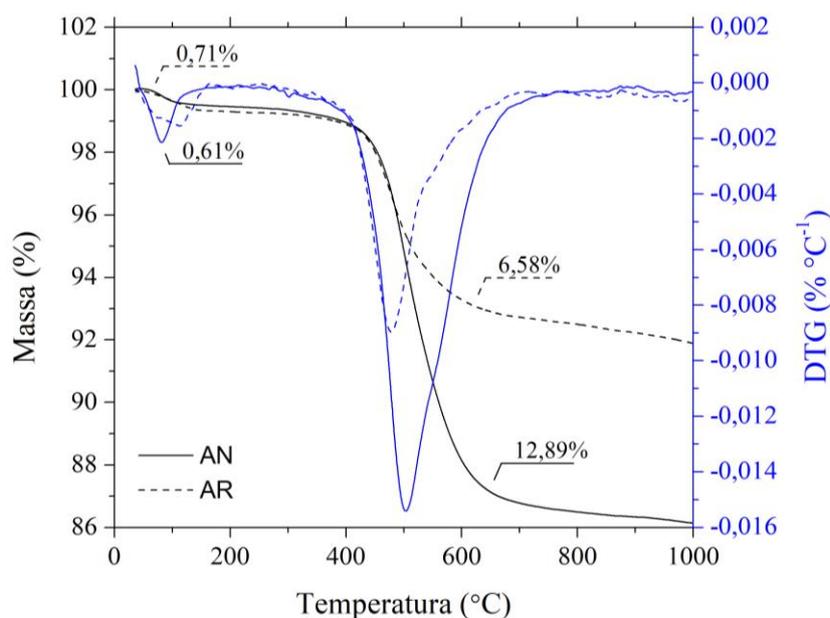
A Tabela 2 apresenta a composição de óxidos da AN e da AR *in natura*. Percebe-se que a AN apresenta uma concentração predominante dos óxidos de silício e alumínio, já a AR contém também outros óxidos em maior quantidade. Uma maior presença de caulinita na AN pode ser verificada por sua razão  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mais próxima de 1. Também é possível analisar que a perda ao fogo (PF) na AN é mais próxima a 14%, que indica um maior teor de caulinita, uma vez que essa é a massa percentual perdida pela caulinita no processo de desidroxilação.

Tabela 2: Composição química das argilas (% em peso), obtida por fluorescência de raios-X.

Argila	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	ZrO <sub>2</sub>	PF
AN	45,70	38,20	0,65	0,39	0,13	0,31	-	-	-	14,62
AR	55,73	23,59	4,14	2,08	1,13	1,09	0,59	0,24	0,02	11,39

Na Figura 3 são apresentados os resultados de TGA e DTG da AN e da AR *in natura* em linha cheia e linha tracejada, respectivamente.

Figura 3: Curvas de TGA/DTG da AN *in natura* (linha cheia) e da AR *in natura* (linha pontilhada).



Há um pico de perda de massa nas curvas *in natura* no início do ensaio até aproximadamente 200 °C, atribuído à liberação da água adsorvida na superfície do material<sup>(16)</sup>. Já o maior pico de perda



de massa é decorrente da desidroxilação. O teor de caulinita do material *in natura*, estimado conforme metodologia de Avet *et al.*<sup>(17)</sup>, é de 92,35% para a AN e de 47,11% para o AR. Estudos<sup>(17)</sup> demonstram uma correlação entre o conteúdo de caulinita da argila utilizada como adição em cimentos LC<sup>3</sup> e a resistência à compressão de argamassas produzidas com estes cimentos.

O valor de IAP para a AN calcinada foi de 1168 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g pozolana enquanto para a AR calcinada foi de apenas 45% desse valor: 527 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g pozolana. Logo, há uma maior atividade pozolânica na AN, apesar de que ambas apresentam o mínimo especificado na literatura para se enquadrarem como materiais pozolânicos, de 436 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g pozolana<sup>(18)</sup>.

Diante do apresentado, espera-se uma maior resistência mecânica de cimentos produzidos com AN em relação à AR, uma vez que esta apresenta maior teor de caulinita e atividade pozolânica. Tal fato é coerente com a literatura, uma vez os estudos<sup>(9)(10)</sup> realizados com estas argilas demonstraram resistências superiores nas composições com AN. Entretanto, apesar de a AR ter um menor IAP, o teor ainda é superior ao mínimo esperado e suas resistências também se enquadram no previsto pelas normas, ainda que inferiores às composições com a AN<sup>(10)</sup>.

### 3.2 Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida

Os resultados da construção do ICV são apresentados na Tabela 3 para UF de 1 kg de argila calcinada. Observa-se que as argilas apresentam diferenças significativas em seus inventários. Considerando as perdas de água no processo de pré-secagem e de calcinação foi necessária uma quantidade inicial de material de aproximadamente 1,39 kg para a AN e 1,09 kg para a AR. Tal diferença se dá especialmente pelo maior teor de umidade e de caulinita da AN em comparação a AR. Assim, essa massa adicional tem influência sobre o transporte dos materiais e para a indústria, que estaria produzindo menos material a partir de uma mesma quantidade inicial.

Tabela 3: Inventário do Ciclo de Vida das Argilas Calcinadas (unidade funcional: 1kg de argila calcinada)

Processo	Descrição	AN	AR
Obtenção	Argila (kg)	1,39	1,09
	Caminhão Euro 3 (Cenário A) (tkm)	0,20	0,01
Transporte	Caminhão Euro 3 (Cenário B) (tkm)	0,41	0,46
	Argila (kg)	1,39	1,09
Calcinação	Entrada		
	Coque de petróleo (kg)	0,08	0,08
	Energia elétrica (kwh)	0,03	0,04
Saída	Água evaporada – pré-secagem (kg)	0,24	0,03

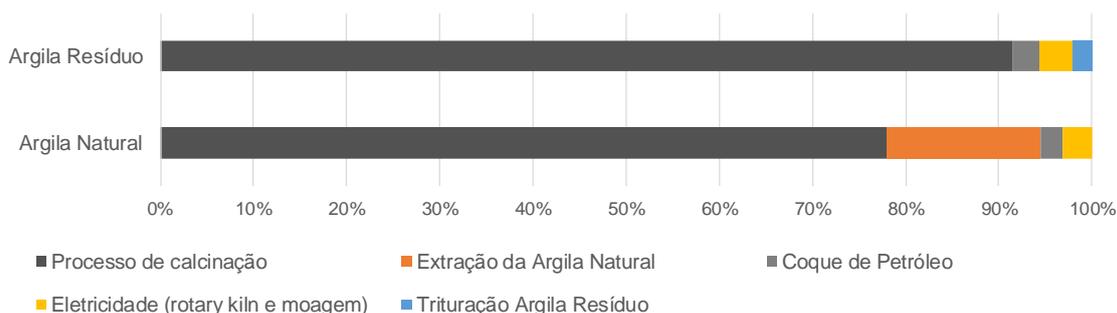


	Vapor água (processo de calcinação) (kg)	0,15	0,07
	CO <sub>2</sub> (coque de petróleo) (kg)	$2,9 \times 10^{-1}$	$2,710^{-1}$
	Metano (coque de petróleo) (kg)	$2,98 \times 10^{-5}$	$2,78 \times 10^{-5}$
	Óxido Nitroso (coque de petróleo) (kg)	$1,8 \times 10^{-6}$	$1,67 \times 10^{-6}$
	Argila calcinada (kg)	1	1
<b>Trituração</b>	Energia (MJ)	-	$8,98 \times 10^{-2}$
<b>Moagem</b>	Energia elétrica (kwh)	$5,10 \times 10^{-4}$	$5,10 \times 10^{-4}$
<b>Produto Final</b>	Argila calcinada moída (kg)	1	1

AN: Argila Natural; AR: Argila Resíduo.

A Figura 5 apresenta uma análise da contribuição porcentual de cada um dos processos na emissão de CO<sub>2</sub>, sem considerar nesta etapa o transporte das argilas do local de coleta até a planta de calcinação.

**Figura 5: Contribuição percentual de cada processo no total de CO<sub>2</sub> gerado, desconsiderando o transporte das argilas do local de obtenção até a planta de calcinação.**



A AN apresenta potencial de impacto para aquecimento global de 374 g de CO<sub>2</sub> eq./ kg de AN, superior 25% à AR que apresentou resultado de 298 g CO<sub>2</sub> eq./ kg de AR. Tal diferença se deve principalmente ao fato de que a AN necessita ser extraída, o que contribui com 16% das emissões do seu ciclo de vida, enquanto tal contribuição é nula para a AR, uma vez que ela é um subproduto da extração de carvão.

O beneficiamento da AR conta com uma etapa adicional de trituração que a AN não possui, sendo que tal processo apresentou uma contribuição de 2% em seu ciclo de vida. Acredita-se que essa etapa de beneficiamento acarretaria em um maior impacto relativo aos demais processos caso fosse avaliada a categoria de consumo de energia elétrica, não avaliada neste estudo que abordou somente a emissão de CO<sub>2</sub>.

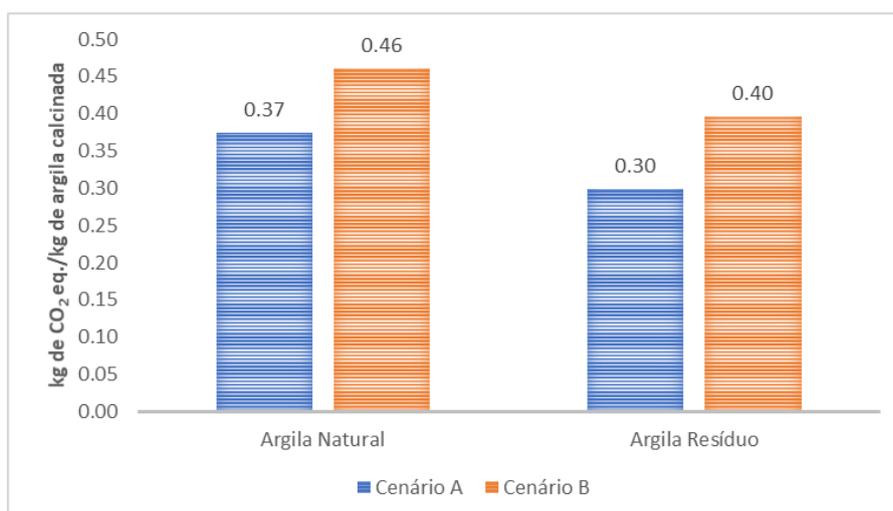
A energia elétrica consumida para os processos do forno rotativo e moagem das argilas são responsáveis juntos por 4% das emissões do ciclo de vida da AR e 3% da AN.



O processo de calcinação apresentou significativa contribuição neste estudo para as duas argilas avaliadas. A calcinação da AN apresenta impacto 6,4% superior à da AR. Tal diferença está relacionada ao fluxo de massa, uma vez que são necessárias maiores quantidades de AN para produzir 1 kg desta argila calcinada. É imprescindível avaliar esta etapa do processo quando se fala em produção de cimentos LC<sup>3</sup>, uma vez que a calcinação das argilas é o diferencial no seu processo produtivo em relação aos cimentos convencionais. No caso dos cimentos Portland com escórias ou cinza volante, tais adições geralmente não passam por nenhum processo de beneficiamento, além de na maioria das vezes serem resíduos de outros processos produtivos.

A Figura 6 apresenta os resultados da ACV considerando os dois cenários de transporte adotados. Percebe-se que a AN possui maiores emissões em ambos os cenários e que a AR apresenta menores impactos mesmo ao considerar maiores distâncias.

Figura 6: Emissões de CO<sub>2</sub> quando levado em consideração o transporte; i) cenário A: menor distância entre o local da argila e da planta de calcinação; ii) cenário B: maior distância entre o local da argila e a planta de calcinação. (UF: 1kg de argila calcinada)



Fazendo uma comparação com o cimento convencional, sabe-se que o Brasil emitia 564 kg CO<sub>2</sub> /t cimento em 2014<sup>(19)</sup> e que a nível mundial esta emissão é ainda maior. Além disso, a emissão na produção do clínquer é ainda maior do que a da produção do cimento, uma vez que ele é o principal responsável pelas emissões dentro do processo produtivo. Portanto, pode-se afirmar, de acordo com este estudo, que a redução do teor do clínquer e consequente incorporação de argilas nos cimentos LC<sup>3</sup> são capazes de reduzir as emissões, uma vez que a segunda emite menos CO<sub>2</sub>.



## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho é realizada uma avaliação preliminar, a partir de resultados laboratoriais e dados secundários, da viabilidade técnica e ambiental da calcinação de argilas com potencial uso em cimentos LC<sup>3</sup>.

Em geral, o maior teor de caulinita presente na argila natural (AN) apresenta possíveis ganhos no desempenho mecânico, porém também tem influência sobre os fluxos mássicos dos processos analisados demandando maior quantidade de argila extraída por kg de argila calcinada. Todos os resultados obtidos na etapa de caracterização das argilas indicam que se espera uma maior resistência mecânica de cimentos produzidos com AN em relação à com AR, em função de seu maior teor de caulinita. Por outro lado, os resultados da ACV indicam que a AR emite menos CO<sub>2</sub> em todos os cenários de transporte considerados. Tal fato se deve especialmente à inexistência de extração e menor teor de água nesta argila, o que propicia um maior rendimento tanto no transporte bem como dentro do processo produtivo.

A calcinação das argilas é a etapa mais crítica do processo em termos de emissão de CO<sub>2</sub>. Entretanto, sabe-se que o uso de argila calcinada como adição permite uma redução do teor de clínquer e uma maior incorporação de fíler calcário, como comprovado em estudos anteriores.

Portanto, é possível afirmar que a AR apresenta menor impacto ambiental, porém, menor desempenho mecânico quando comparada a argila natural, ainda que atenda aos requisitos mínimos normativos. Em virtude de tais particularidades, é imprescindível avaliar em futuros estudos o desempenho mecânico e o ciclo de vida da substituição parcial do clínquer pelas argilas calcinadas.



## 5. REFERÊNCIAS

1. FISCHEDICK, M.; ROY, J; ABDEL-AZIZ, A.; ACQUAYE, A.; ALLWOOD, J. M.; CERON, J. P.; GENG, Y.; KHESHGI, H.; LANZA, A.; PERCZYK, D.; PRICE, L.; SANTALLA, E.; SHEINBAUM, C.; TANAKA, K. Industry. In: EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C.; ZWICKEL, T.; MINX, J. C. (eds.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
2. IEA; CSI. **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. 2018. 66 f.
3. SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub>, cement-based materials industry**. Paris: United Nations Environment Programme, 2016. 65 p.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
5. ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: Disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
6. PATYK, A. Thermoelectrics: impacts on the environment and sustainability. **Jounal of Electronic Materials**, vol. 39, n. 9, p. 2023-2018, 2010.
7. HERNANDEZ, J. F. M.; SCRIVENER, K. Development and Introduction of a Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement in Cuba. In: Scrivener K., Favier A. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. RILEM Bookseries, vol 10. Dordrecht: Springer, 2015.
8. LARROYD, F. **Geologia e Caracterização Tecnológica Dos Principais Depósitos de Caolim Do Estado Do Rio Grande Do Sul: Ênfase a Utilização Na Indústria Do Papel**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
9. DORNELLES, A. M.; SILVA, F. T. da; SOUZA, F. de; RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P. **Caracterização de argilas gaúchas com potencial de aplicação para produção de ligantes alternativos**. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018.
10. MALACARNE, C. S. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos ternários com baixo teor de clínquer (LC3) a partir de calcários e fontes cauliniticas do Rio Grande do Sul**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
11. LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.
13. KELLENBERGER D., ALTHAUS, H. –J., JUNGBLUTH, N., KÜNNIGER, T., LEHMANN, M., THALMANN P. **Life Cycle Inventories of Building Products**. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. 2007.



14. PILLAI, R. G., GETTU, R., SANTHANAM, M., RENGARAJU, S., DHANDAPANI, Y., RATHNARAJAN, S., BASAVARAJ, A. S. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 118, p. 111-119, 2019.
15. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro. 292 p.
16. SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEEN, J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 74, n. 1, p. 211-278, 2012.
17. AVET, F.; SNELLINGS, R.; DIAZ, A. A.; HAHN, M. B.; SCRIVENER, K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 1–11, 2016.
18. GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
19. SNIC. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, 2019. 64 f.



# INDICADORES DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS: COMPARATIVOS A NÍVEL MUNDIAL, BRASIL E PORTUGAL E ENTRE DUAS UNIVERSIDADES DESTES PAÍSES

**Fabiana Rosa<sup>(1)</sup>; Andrea Kern<sup>(2)</sup>; Luís Bragança<sup>(3)</sup>**

(1) Universidade do Vale do Rio dos Sinos – fabianaros@unisinos.br; (2) Universidade do Vale do Rio dos Sinos – apkern@unisinos.br; (3) Universidade do Minho – braganca@civil.uminho.pt

## RESUMO

A necessidade de crescimento das instituições implica na ciência dos problemas e a necessidade de um desenvolvimento sustentável, para tal são coletados uma série de indicadores. O objetivo do trabalho foi analisar o comportamento de indicadores relacionados aos resíduos gerados a nível mundial, Brasil e Portugal e em duas universidades destes países. As coletas e análises foram realizadas a partir de dados da OECD e relatórios de sustentabilidades das instituições. A geração de resíduos urbanos mundiais vem reduzindo de 2008 a 2017 (541,8 a 524,4kg/capita). Portugal apresentou uma redução até 2013 (513,7 a 436,7kg/capita), porém nos anos seguintes seus índices aumentaram (449,9 a 485,2kg/capita). No Brasil (2009 a 2011) ocorreu uma redução dos índices (271,9 a 266,8kg/capita) e um aumento no ano de 2012 (288,7kg/capita). Na universidade de Portugal houve um aumento nos anos de 2010 a 2014 (4,02 a 9,02kg/aluno) e uma redução em 2015 (3,46kg/aluno), assim como no Brasil, que apresentou um aumento nos anos de 2016 a 2018 (19,53 a 25,08 39kg/aluno). As universidades apontam uma tendência de aumento na geração de resíduos, enquanto os dados mundiais uma redução. Evidencia-se a necessidade de ações com o intuito de reduzir estes índices.

**Palavras-chave:** indicadores, resíduos sólidos, universidades, sustentabilidade.

## SOLID WASTE INDICATORS GENERATED: COMPARATIVE WORLDWIDE, BRAZIL AND PORTUGAL AND BETWEEN TWO UNIVERSITIES OF THOSE COUNTRIES

### ABSTRACT

The need for institutional growth implies knowing the problems and the need for sustainable development, for which a series of indicators are collected. The objective of this study was to analyze the behavior of indicators related to waste generated worldwide, Brazil and Portugal and in two universities in these countries. The data collection and analysis were carried out using OECD data and institutional sustainability reports. The generation of municipal waste worldwide has been reducing from 2008 to 2017 (541.8 to 524.4 kg/capita). Portugal presented a reduction until 2013 (513.7 to 436.7 kg/capita), but in the following years its rates increased (449.9 to 485.2kg/capita). In Brazil (2009 to 2011) there was a reduction in the indices (271.9 to 266.8 kg/capita) and an increase in the year 2012 (288.7 kg/capita). In the University of Portugal there was an increase in the years 2010 to 2014 (4.02 to 9.02 kg/student) and a reduction in 2015 (3.46 kg/student), as well as in Brazil, which showed an increase in the years 2016 to 2018 (19.53 to 25.08kg/student) and a reduction in the last year (20.13kg/student). Universities point to a growing trend in waste generation, while the world data a reduction. There is evidence of the need for actions to reduce these indices.

**Key-words:** indicators, waste, universities, sustainability.



## 1. INTRODUÇÃO

A reflexão sobre desenvolvimento implicou em um crescimento da consciência sobre os problemas ambientais que ocorreram devido aos padrões de vida incompatíveis com a regeneração do meio ambiente. O desenvolvimento sustentável pode ser definido e operacionalizado a partir do desenvolvimento e aplicação de sistemas de indicadores ou ferramentas de avaliação que possam mensurar a sustentabilidade. Os objetivos do desenvolvimento sustentável desafiam as instituições contemporâneas, que estão relutando em reconhecer que esse processo esteja ocorrendo. <sup>(1)</sup>

As instituições de ensino superior podem ser comparadas com pequenos núcleos urbanos, pois envolve uma séria de atividades relacionadas ao ensino, a pesquisa, a extensão e outras à operação como bares, restaurantes, alojamentos, centros de conveniência, entre outras facilidades. Somado as necessidades dessas atividades é preciso uma infra-estrutura básica, que engloba, entre outros, redes de abastecimento de água e energia, redes de saneamento e coleta de águas pluviais e vias de acesso. Estas atividades de operação consomem recursos e geram resíduos, ou seja, em uma visão industrial apresentam *inputs* e *outputs*.<sup>(2)</sup>

Segundo Leal Filho et al. <sup>(3)</sup> uma universidade é composta por uma comunidade de indivíduos na qual suas operações envolvem uma ampla gama de instalações e atividades, incluindo todos os resíduos associados que geram, os consumos de produtos químicos, energia utilizada e outras demandas.

Tauchen e Brandli<sup>(2)</sup> destacam alguns benefícios da implementação de um sistema de gestão ambiental, como aumento da produtividade, redução no consumo de energia, água e materiais de expediente, conformidades com a legislação ambiental reduzindo os riscos de penalidades ou gerar passivos ambientais, práticas responsáveis, melhoria na imagem externa da instituição e a geração de oportunidades de pesquisa.

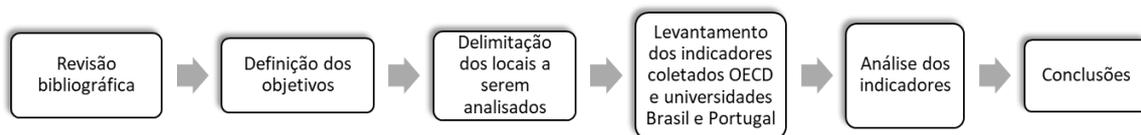
Em função do foco da pesquisa, cabe aqui ressaltar os tópicos referente ao meio ambiente e para tal foram destacados os indicadores disponíveis considerando os parâmetros referente aos resíduos gerados. A partir da bibliografia repertoriada algumas questões foram colocadas, dentre elas, como se dava o comportamento dos indicadores referente a geração dos resíduos a nível mundial, com destaque a dois países, quais sejam Brasil e Portugal. Além disso, o estudo se propõe a verificar as tendências de geração de resíduos de duas universidades destes países.



## 2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada encontra-se apresentada na figura 1.

Figure 1 – Metodologia de elaboração do trabalho



Fonte: elaborado pelo autor

A escolha destes países e universidades se deu em função da autora estar realizando o doutorado no Brasil e ter desenvolvido seu doutorado sanduíche em Portugal, o que possibilitou o desenvolvimento, interesse e acesso as informações.

O levantamento dos indicadores relacionados a geração de resíduos coletados foi realizado a partir de dados divulgados pela OECD, considerando os valores globais e os índices do Brasil e de Portugal. Já para as universidades, foram utilizados os relatórios de sustentabilidade e de gestão ambiental geradas pelas mesmas. A escolha desse banco de dados se deu a partir da representatividade mundial e participação de vários países nesta organização. A OECD <sup>(4)</sup> em conjunto com os governos, trabalha no estabelecimento de normas internacionais e na busca de soluções baseadas em evidências nas questões sociais, econômicas e ambientais. Foram destacados os dados referente ao indicador de geração de resíduos urbanos.<sup>(5)</sup>

Os dados e elementos gráficos foram apresentados e gerados a partir dos resultados divulgados na OECD, sendo evidenciado os dados mundiais (OECD Total), dos países que apresentam maiores índices, do Brasil e de Portugal.

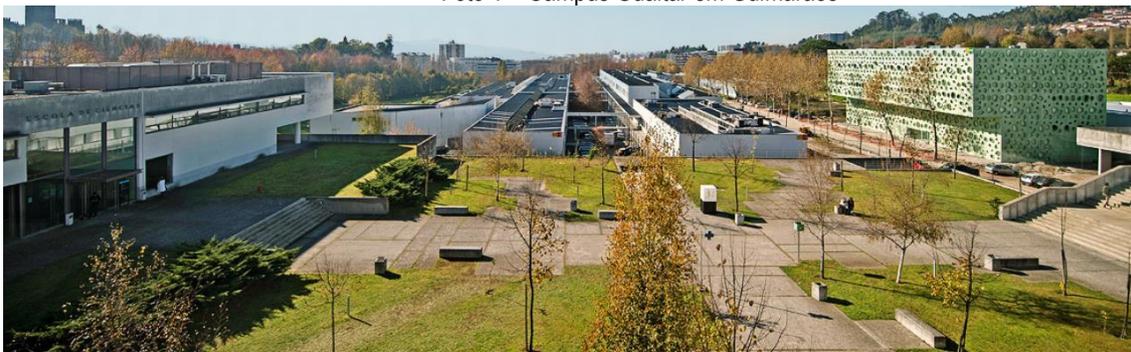
Foi realizado uma breve apresentação das universidades, com ênfase nas questões de sustentabilidade ambiental. Os períodos de análise foram limitados aos últimos 10 anos de coleta da OECD (2007 a 2017), 5 anos para a universidade de Portugal (2010 a 2015) e 3 anos para a do Brasil (2016 a 2018). Ressalta-se que esse período variou devido a disponibilidade de informações por parte dos países e instituições. Os indicadores das universidades foram analisados considerando os resíduos gerados em peso (kg) e o número de discentes matriculados nas instituições, assim como os dados da OECD foram apresentados em peso/capita.



## 2.1 Universidade do Minho (UMinho) - Portugal

Foi fundada em 1973, sendo reconhecida como um agente central na região, uma importante referência nacional, no panorama europeu e global. <sup>(6)</sup> Conta com o campus de Gualtar, em Braga, o campus de Azurém (foto 1) e de Couros, em Guimarães.

Foto 1 – Campus Gualtar em Guimarães



Fonte: <https://www.uminho.pt/PT/uminho/Paginas/default.aspx#> <sup>(7)</sup>

A estrutura organizacional é flexível e favorável à inovação e à interdisciplinaridade, disposta em diferentes tipos de unidades: unidades orgânicas de ensino e investigação; unidades culturais; e unidades de serviços. <sup>(8)</sup> Apresenta um conjunto de infraestruturas e de serviços de apoio aos alunos e ao ensino, que consta de bibliotecas, laboratórios, reprografias, bancos, livrarias, bares, cantinas e restaurantes. <sup>(9)</sup>

O primeiro Relatório de Sustentabilidade da Universidade (RSUM) foi referente ao ano de 2010, no qual divulga o desempenho econômico, ambiental e social a todas as partes interessadas. <sup>(10)</sup> A universidade iniciou o processo de compromisso com o “United Nations Global Compact” (UNGC) em 2013, iniciativa lançada pelas Nações Unidas com a intenção de desenvolver estratégias e políticas empresariais e da sociedade através do compromisso com 10 princípios universais. <sup>(11)</sup> A universidade seguiu as diretrizes da Global Reporting Initiative (GRI) para desenvolver os relatórios, sendo, a primeira universidade portuguesa a utilizar o GRI, a 2ª europeia e a 6ª a nível mundial.

## 2.2 Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)/Brasil

Possui 50 anos de história, buscando o desenvolvimento, a educação continuada e a capacidade de inovação. <sup>(12)</sup> É uma universidade jesuítica (foto 2) cujo objetivos estão alicerçados na excelência acadêmica, ensino, qualidade do ensino, pesquisa, extensão e integração comunitária, recursos humanos, autonomia institucional e sustentabilidade dos seus empreendimentos, parcerias e



intercâmbios. Seus princípios de gestão estão focados no desenvolvimento humano e competência profissional, participação corresponsável, integração e qualidade. <sup>(14)</sup>

Foi a primeira universidade da América Latina a conquistar a certificação ambiental ISO 14001, evidenciando o seu comprometimento com as questões referentes a impactos ambientais de suas atividades. A implementação e manutenção da ISO 14001 é realizado pelo sistema de gestão ambiental (SGA) da Unisinos, baseado em um processo de melhoria contínua. <sup>(15)</sup>

Foto 2 – Campus São Leopoldo



Fonte: <http://www.unisinos.br/noticias/sobre> <sup>(13)</sup>

Possui bibliotecas, um complexo multifuncional, institutos de pesquisa, tecnologia e reflexão, e um complexo tecnológico. <sup>(16)</sup> Está entre as maiores universidades privadas do Brasil, com cerca de 31 mil alunos. Além dos campi em São Leopoldo, e Porto Alegre, a Unisinos está presente em oito estados do país. <sup>(17)</sup>

O programa Energia Positiva e o Comitesinos são algumas ações através do qual o SGA desenvolve atividades para integração de toda a comunidade acadêmica nos processos relacionados ao meio ambiente e a certificação ISO 14001. Os resultados são apresentados através de relatórios, disponíveis no site da instituição de 2016 a 2018. <sup>(18)</sup> <sup>(19)</sup> <sup>(20)</sup> <sup>(21)</sup>



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Dados obtidos a partir da OECD

Os dados obtidos a partir da OECD <sup>(22)</sup>, considera resíduos urbanos aqueles coletados e tratados pelo município. Na figura 2 pode-se visualizar, a dimensão da geração de resíduos urbanos pelos países no último ano em que este dado foi apresentado. Já na figura 3 é possível visualizar um mapa em que houveram dados do Brasil (2012). Para este ano cabe observar que a Dinamarca apresentava a maior dimensão, seguida da Noruega. Portugal neste período também apresentava uma dimensão maior que do Brasil.

**Figura 2 – Resíduos urbanos em quilogramas/capita no ano de 2017 e 2012**



Fonte: OECD (2019), Municipal waste (indicator). doi: 10.1787/89d5679a-en (Accessed on 24 March 2019)

Estes mapas podem ser analisados em conjunto com a tabela 1 que apresenta os índices de resíduos urbanos gerados nos anos de 2008 a 2017. Pode-se observar que em 2017, dos países em que são coletados este indicador, o índice OECD total é de 524,4 kg/capita. Portugal emite 485,2kg/capita, o que equivale a -7,48% do OECD total.

De acordo com o último ano de coleta do Brasil (em 2012), Portugal apresentava 450,4kg/capita que correspondia a -13,75% do OECD Total e Brasil apresentava 288,7Kg/ capita, apresentando um índice -44,71% do OECD Total.

Tabela 1 – Resíduos urbanos em quilogramas / capita, 2008 a 2017

Localização	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
OECD total	541,8	530,0	530,3	527,4	522,2	519,7	520,6	523,2	526,8	524,4
Portugal	513,7	515,6	512,3	487,3	450,4	436,7	449,9	457,7	472,2	485,2
Brasil	-	271,9	269,3	266,8	288,7	-	-	-	-	-

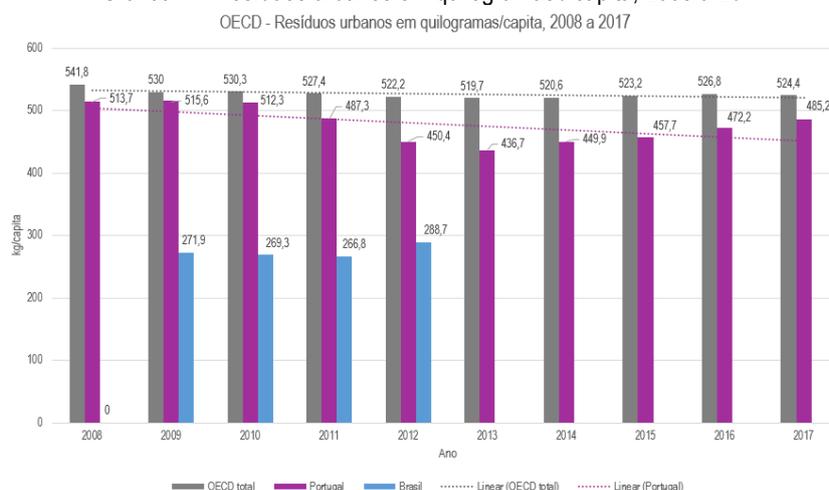
Fonte: OECD (2019), Municipal waste (indicator). doi: 10.1787/89d5679a-en (Accessed on 24 March 2019)

No gráfico 1 é apresentado os valores e as tendências. Verifica-se que Portugal e Brasil geram índices inferiores a OECD Total. Tanto o índice OECD total quanto de Portugal apontam uma tendência de redução considerando os anos de 2008 a 2017. Ressalta-se que em Portugal, seus



índices vêm aumentando, passando de 436,7kg/capita em 2013 para 485,2kg/capita em 2017. No Brasil, considerando os anos de 2009 a 2012, indica-se um aumento de tendência.

Grafico 1 – Resíduos urbanos em quilogramas / capita, 2008 a 2017



Fonte: baseado em: OECD (2019), Municipal waste (indicador). doi: 10.1787/89d5679a-en (Accessed on 24 March 2019)

### 3.2 Dados Universidade do Minho - Portugal

Foram apresentados os indicadores coletados conforme dados presentes nos RSUM (2010 a 2015). Esses indicadores são enquadrados de acordo como GSI como G4-EN23 (Peso total de resíduos, discriminado por tipo e método de disposição), apresentados na tabela 2.

Para a análise dos indicadores foi considerado o número de discentes na instituição (tabela 3). Verifica-se um aumento do universo discente no decorrer dos anos de 2010 a 2012, e após uma certa estabilidade. A tendência linear aponta um aumento no decorrer dos anos analisados.

Tabela 2 – Indicadores de sustentabilidade ambiental UMinho – Aspecto: Resíduos

G4-EN23	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Peso total de resíduos, discriminado por tipo e método de disposição (ton.)	71,68	71,65	117,27	122,21	165,38	63,41
Resíduos Perigosos (ton.)	6,07	4,58	6,57	8,37	12,26	13,18
Resíduos não Perigosos (ton.)	65,61	67,07	110,7	113,84	153,13	50,23

Fonte: Baseado nos RSUM de 2010 a 2015

Tabela 3 – Dimensão do universo discente UMinho 2010 a 2015

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dimensão do universo discente	17828	17957	18729	18522	18332	18331

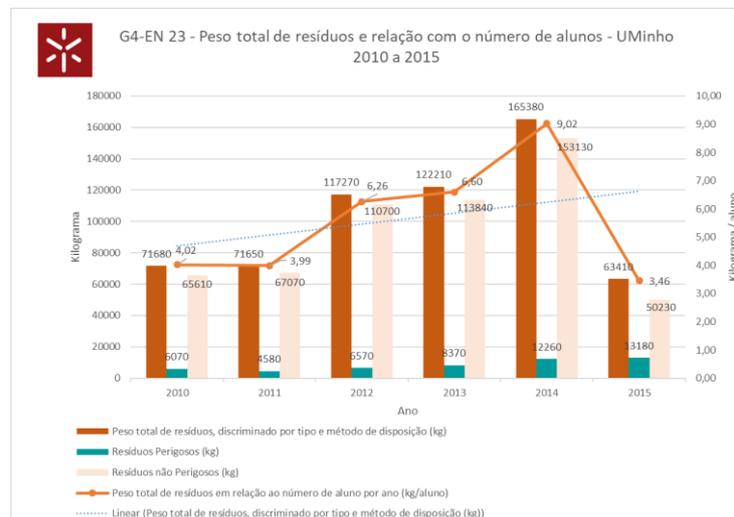
Fonte: baseado nos dados dos RSMU de 2010 a 2015



De acordo com o RSUM 2015<sup>(23)</sup> existem os resíduos gerados com necessidade de tratamento e os resíduos urbanos. De acordo com o G4-EN23 verifica-se uma tendência a aumento deste indicador ao longo dos anos (gráfico 2), tanto para os resíduos perigosos como para os não perigosos. É possível observar um aumento do ano de 2011 para 2012 (45,62ton), que segundo o RSUM 2102-2013, não se deve a um aumento de produção, mas por novos processos e metodologias que foram alteradas. No ano de 2013 para 2014 ocorreu também um aumento significativo de 43,17ton.

No ano de 2014 para 2015, foi possível observar uma redução de 101,97toneladas, e a taxa reduziu de 9,02 para 3,46kg/aluno. Os resíduos não perigosos foram os que mais impactaram.

Gráfico 2 – Peso total de resíduos e relação com o número de alunos



Fonte: baseado no relatório RM 2015, elaborado pelo autor

Existem pontos de separação de lixo espalhados pela universidade. De acordo com o RSMU 2014, a partir da sensibilidade dos seus colaboradores e cooperação de entidades terceira, foi possível valorizar grande parte dos resíduos produzidos pelo laboratório provenientes do departamento da engenharia civil.

### 3.3 Dados UNISINOS - Brasil

Os indicadores coletados foram obtidos através dos dados apresentados nos relatórios anuais do SGA (2016 a 2018). Os dados de geração de resíduos são apresentados como resíduos perigosos e diversos (tabela 4).



Para análise dos indicadores foi considerado o número de discentes matriculados (tabela 5), o que se verifica uma diminuição no decorrer dos anos de 2016 a 2018, apontando uma redução na tendência linear. (19) (20) (21)

Tabela 4 – Indicadores de sustentabilidade ambiental UNISINOS – Aspecto: Resíduos

	2016	2017	2018
Geração de resíduos (kg)	543.083	617.000	601.485
Geração de resíduos Perigosos e diversos (kg)	9.855	9.618	9.770
Resíduos não Perigosos (kg)	533.228	607.382	591.715

Fonte: baseado nos Relatórios anuais do sistema de gestão ambiental de 2016 a 2018 (19) (20) (21)

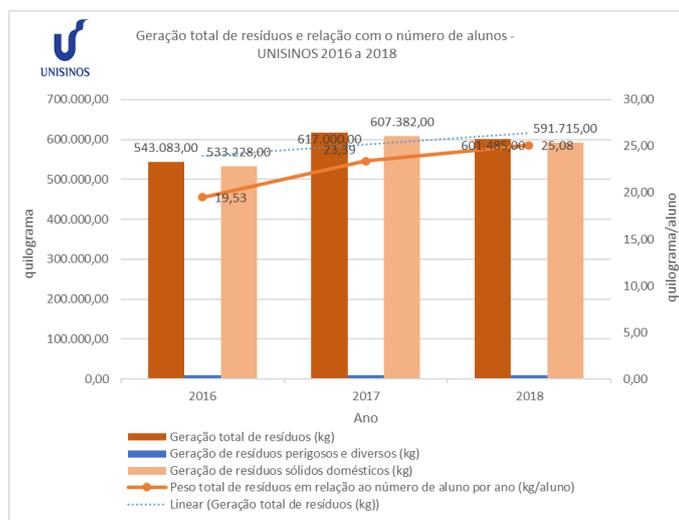
Tabela 5 – Dimensão do universo discente UNISINOS 2016 a 2018

	2016	2017	2018
Dimensão do universo discente	27.811	26.381	23.982

Fonte: Baseado nos Relatórios anuais do sistema de gestão ambiental de 2016 a 2018 (19) (20) (21)

De acordo com os dados coletados verifica-se uma tendência a aumento deste indicador ao longo dos anos (gráfico 3), tanto para os resíduos perigosos e diversos, como para os não perigosos. É possível observar um aumento no ano de 2017, aumentando em 73,92ton em relação a 2016, assim como um acréscimo de 3,96kg/aluno. Já no ano de 2018 observa-se uma redução em relação ao ano anterior de 15,52ton, porém um aumento de 1,69kg/aluno.

Gráfico 3 – Geração total de resíduos e relação com o número de alunos



Fonte: Baseado nos Relatórios anuais do sistema de gestão ambiental de 2016 a 2018 (19) (20) (21)



## 4. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos na OECD pode-se verificar que Portugal e Brasil geram índices inferiores a OECD Total. O índice OECD total e o de Portugal apontam uma tendência de redução considerando os anos de 2008 a 2017. Ressalta-se que em Portugal, seus índices vêm aumentando, passando de 436,7kg/capita em 2013 para 485,2kg/capita em 2017. No Brasil, considerando os anos de 2009 a 2012, indica-se um aumento de tendência em que seus índices variaram de 271,9kg/capita a 288kg/capita.

Para as universidades analisadas, observa-se que tanto em Portugal quanto no Brasil, apresentaram tendência de aumento de geração de resíduo. Na Universidade do Minho observou-se aumento do ano de 2011 para 2012 (45,62ton) e nos anos de 2013 para 2014 ocorreu também um aumento significativo de 43,17ton. Já no ano de 2014 para 2015, foi possível observar uma redução significativa deste indicador de 101,97 toneladas em que a taxa de toneladas de resíduos gerados reduziu de 9,02kg/aluno para 3,46kg/aluno. Na UNISINOS foi observado um aumento no ano de 2017, aumentando em 73,92ton em relação a 2016, o que gerou um acréscimo de 3,86kg/aluno, porém um índice de 23,39kg/aluno. Já no ano de 2018 observa-se uma redução em relação ao ano anterior de 15,52ton, porém um aumento para 1,69kg/aluno, com um índice de 25,08kg/aluno.

Os dados referentes as questões ambientais a nível mundial estão divulgadas com defasagem em torno de 2 anos, assim como ocorre com a instituição de ensino de Portugal, que apresentam, até a realização deste trabalho, os seus relatórios de sustentabilidade referente ao ano de 2015. Já em relação a universidade do Brasil os dados são divulgados anualmente nos relatórios de sistema de gestão ambiental. Observa-se a necessidade de coleta e divulgação dos dados mais próximo do período analisado para efetiva tomada de ações.

O papel das universidades é considerado fundamental para formação de novas gerações de profissionais e cidadãos com uma visão sustentável, porém as tendências apresentadas estão apontando a necessidade de mais ações nestas instituições, voltadas a preocupação em geração de resíduos, assim como a uma necessidade de novos conceitos em relação a gerenciamento das instalações.



## 5. REFERÊNCIAS

1. BELLEN, H. M. **Indicadores de sustentabilidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2006.
2. TAUCHEN, J., BRANDLI, L.L. A gestão ambiental em instituições de ensino superior: modelo para implantação em campus universitário. **Gestão & Produção**, vol.13, p. 503-515, 2006.
3. LEAL FILHO, W. et al. Sustainable development policies as indicators and pre-conditions for sustainability efforts at universities: Fact or fiction? **International Journal of Sustainability in Higher Education**, vol. 19, ed. 1, p.85-113, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/IJSHE-01-2017-0002>>. Acesso em: 10 fev. 2018.
4. OECD: BETTER POLICIES FOR BETTER LIVES. **About**. [2019?]. Disponível em: <<http://www.oecd.org/about/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.
5. OECD. **Data**. [2019?]. Disponível em: <[https://data.oecd.org/searchresults/?hf=20&b=0&r=%2Bf%2Ftype%2FIndicators&r=%2Bf%2Ftopics\\_en%2Fenvironment&l=en&s=score](https://data.oecd.org/searchresults/?hf=20&b=0&r=%2Bf%2Ftype%2FIndicators&r=%2Bf%2Ftopics_en%2Fenvironment&l=en&s=score)>. Acesso em: 22 mar. 2019.
6. UNIVERSIDADE DO MINHO. **História**. Braga, [2019?]. Disponível em: <<http://https://www.uminho.pt/PT/uminho/Informacao-institucional/Paginas/Historia.aspx>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
7. \_\_\_\_\_. **UMinho**. Braga, [2019?]. Disponível em: <<https://www.uminho.pt/PT/uminho/Paginas/default.aspx#>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
8. \_\_\_\_\_. **Unidades**. Braga, [2019?]. Disponível em: <<https://www.uminho.pt/PT/uminho/Unidades/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
9. \_\_\_\_\_. **Serviços**. Braga, [2019?]. Disponível em: <<https://www.uminho.pt/PT/uminho/Unidades/Servicos/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
10. \_\_\_\_\_. **Relatório de sustentabilidade 2010**. Braga, 2012. Disponível em: <<https://www.uminho.pt/PT/uminho/Informacao-Institucional/Relatrios/relatorio-de-sustentabilidade-2010.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2019.
11. \_\_\_\_\_. **Relatório de sustentabilidade 2012-2013**. Braga, 2014. Disponível em: <[https://www.uminho.pt/PT/uminho/Informacao-Institucional/Relatrios/relat%C3%B3rio\\_sustentabilidade\\_2012\\_2013.pdf](https://www.uminho.pt/PT/uminho/Informacao-Institucional/Relatrios/relat%C3%B3rio_sustentabilidade_2012_2013.pdf)>. Acesso em: 16 fev. 2019.
12. UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. **História**. São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/institucional/a-unisinos/historia>>. Acesso em: 19 abr. 2019.
13. \_\_\_\_\_. **Notícias Unisinos: sobre**. São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/noticias/sobre>>. Acesso em: 20 abr. 2019.
14. \_\_\_\_\_. **Valores institucionais**. São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/institucional/a-unisinos/valores-institucionais>>. Acesso em: 19 abr. 2019.
15. \_\_\_\_\_. **Reconhecimento**. São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/institucional/a-unisinos/reconhecimento>>. Acesso em: 19 abr. 2019.
16. \_\_\_\_\_. **Estrutura**. São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/institucional/estrutura/apresentacao>>. Acesso em: 19 abr. 2019.



17. \_\_\_\_\_. **Apresentação.** São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/institucional>>. Acesso em: 20 abr. 2019.
18. \_\_\_\_\_. **SGA Unisinos.** São Leopoldo, [2019?]. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/institucional/meio-ambiente/sga-unisinos>>. Acesso em: 20 abr. 2019.
19. \_\_\_\_\_. **Relatório anual sistema de gestão ambiental Ano 2016.** São Leopoldo, 2016. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/images/institucional/meio-ambiente/relatorios/relatorio-atividades-SGA-2016.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2019.
20. \_\_\_\_\_. **Relatório anual sistema de gestão ambiental Ano 2017.** São Leopoldo, 2017. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/images/institucional/meio-ambiente/relatorios/Relatorio-Atividades-SGA-2017.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2019.
21. \_\_\_\_\_. **Relatório anual sistema de gestão ambiental Ano 2018.** São Leopoldo, 2018. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/images/institucional/meio-ambiente/relatorios/Relatorio-Atividades-SGA-2018.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2019.
22. OECD:Data. **Municipal Waste** [2019?]. Disponível em: <<https://data.oecd.org/waste/municipal-waste.htm>>. Acesso em: 24 mar. 2019.
23. \_\_\_\_\_. **Relatório de sustentabilidade 2015.** Braga, 2016. Disponível em: < <https://www.uminho.pt/PT/uminho/Informacao-Institucional/Relatrios/Relato%CC%81rio%20de%20Sustentabilidade%202015.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2019.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro para este estudo.



## ARGAMASSA CONTENDO ÓXIDO DE FERRO MAGNÉTICO RECUPERADO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS PARA USO EM BLINDAGENS DE RADIAÇÃO

**Deuander O. Mello** <sup>(1)</sup>; **Gabriela O. Orlando** <sup>(2)</sup>; **Rodrigo A. Silva** <sup>(3)</sup>;  
**Richard T. Lermen** <sup>(4)</sup>; **Djalmo D. S. Neto** <sup>(5)</sup>; **Rogério Ferreira Junior** <sup>(6)</sup>

(1) Faculdade Meridional – deuander@gmail.com; (2) Faculdade Meridional – gabriela.orlando@hotmail.com;  
(3) Faculdade Meridional – rodrigo.silva@imed.edu.br; (4) Faculdade Meridional – richard.lermen@imed.edu.br; (5) Faculdade Meridional – 1112250@imed.edu.br; (6) Faculdade Meridional – rogeriof1998@gmail.com

### RESUMO

O reaproveitamento de resíduos na forma de produtos para construção civil além de dar uma destinação aos mesmos ainda auxilia para diminuir o consumo de recursos naturais, reduzir custos e pode acarretar benefícios técnicos, o que fora observado no presente trabalho. Destaca-se a utilização da Drenagem Ácida de Minas – DAM, um efluente do setor de mineração de carvão que causa graves problemas ambientais, para extração de pigmento magnético de óxido de ferro. E que este produto demonstrou ser um material aplicável na composição de argamassas. O material foi utilizado em substituição da areia natural, minimizando impactos do setor de extração. Devido à sua presença, o compósito foi avaliado quanto à participação para blindagem radiológica, sendo produzidas amostras de referência e outras contendo 20% do pigmento recuperado da DAM. As análises ocorreram pela incidência de raios X sobre as amostras e leitura da blindagem e, através disso, foi percebido que a argamassa contendo o óxido magnético recuperado do efluente obteve ganhos de atenuação em relação à convencional de cerca de 13%. Sendo assim, o uso deste material além de acarretar benefícios ambientais, ainda colabora para manter a segurança dos locais que envolvem processos com radiações.

**Palavras-chave:** argamassa magnética, blindagem de radiação, Drenagem Ácida de Minas – DAM.

## MORTAR CONTAINING IRON OXIDE RECOVERED FROM ACID MINE DRAINAGE FOR USE IN RADIATION SHIELDS

### ABSTRACT

The reuse of waste in the form of products for civil construction, besides giving a destination to them, also helps to reduce the consumption of natural resources, reduce costs and can bring technical benefits, which was observed in the present work.. We highlight the use of Acid Drainage of Mines - DAM, an effluent from the coal mining sector that causes serious environmental problems, for the extraction of magnetic pigment from iron oxide. And that this product has proved to be an applicable material in the composition of mortars. The material was used in substitution of the natural sand, minimizing impacts of the extraction sector. Due to its presence, the composite was evaluated for participation in radiological shielding, being produced reference samples and others containing 20% of the pigment recovered from DAM. The analyzes were carried out by the X-ray incidence on the samples and reading of the shield and, through this, it was noticed that the mortar containing the recovered magnetic oxide of the effluent obtained gains of attenuation in relation to the conventional one of about 13%. Therefore, the use of this material in addition to bringing environmental benefits, also contributes to maintain the safety of the places that involve processes with radiations.

**Key-words:** magnetic mortar, radiation shield, Acid Mine Drainage – AMD.



## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil, assim como outros segmentos da indústria, tem buscado realizar o reaproveitamento de materiais potenciais, sendo que, muitos deles são advindos de resíduos. A incorporação destes pode ocorrer com o objetivo de reduzir custos ou potencializar alguma propriedade específica dos materiais e, principalmente, tratar os passivos ambientais.

O carvão mineral tem participação em cerca de 40% da energia elétrica mundial. Porém, em seu processo de extração, os rejeitos são geralmente depositados em torno da mineradora, o que causa problemas em grande escala. O principal resíduo gerado é a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), um sulfeto de ferro que, quando exposto ao oxigênio e a umidade, sofre oxidação. A água das chuvas ao entrar em contato com a pirita oxidada forma uma drenagem altamente poluidora, a Drenagem Ácida de Minas – DAM. Tal efluente traz danos para a vegetação e contamina os corpos hídricos, tratando-se do pior problema ambiental associado à mineração<sup>(1,2,3,4)</sup>.

É evidente que existe a necessidade em diminuir a geração de rejeitos pelas carboníferas, realizar um adequado tratamento daqueles que não puderem ser evitados, bem como, buscar o seu reaproveitamento na forma de produtos. Um dos materiais capazes de serem extraídos da DAM tratam-se de óxidos de ferro sintéticos. Ressalta-se, ainda, que os óxidos de ferro naturais possuem capacidade para potencializar concretos e argamassas para blindagens de radiação<sup>(5,6)</sup>.

A atenuação ou blindagem de radiação é característica necessária para a construção de laboratórios, salas de exames, entre outros, uma vez que a exposição a energias elevadas pode causar danos à saúde dos seres humanos. Deste modo, o material utilizado como vedação deve ser capaz de reduzir a intensidade dos raios até níveis não perigosos, sendo determinante da otimização do projeto<sup>(7)</sup>.

Os produtos cimentícios são empregados para proteção radiológica e podem receber adições em sua composição visando o acréscimo da blindagem<sup>(8,9)</sup>. A magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) tem sido aplicada em misturas cimentícias com sucesso, não afetando a hidratação da pasta e alcançando níveis superiores de atenuação<sup>(10,11,12)</sup>. Este óxido de ferro é extraído de depósitos naturais na forma de uma pedra mineral de elevada dureza e altamente magnética, de cor preta e brilho metálico<sup>(13,14)</sup>. Sendo que, também existe a possibilidade de obter a magnetita através de um processo químico que tem como matéria-prima um dos rejeitos da mineração de carvão<sup>(15)</sup>.



O tratamento mais empregado para a DAM é denominado tratamento ativo. Este modelo consiste em processos de neutralização/precipitação/sedimentação<sup>(2)</sup>. Contudo, resulta em custos operacionais, energéticos e pelo uso de reagentes, além da geração de grande volume de lodo<sup>(16)</sup>. Como forma de tratamento alternativo da DAM, tem-se a precipitação seletiva, a qual possui custos menores do que o tratamento ativo, além de possibilitar a recuperação do ferro na forma de óxidos, que podem ser empregados em materiais de construção<sup>(15,17,18)</sup>.

Baseado nestas premissas, o presente estudo descreve a produção de pigmento de magnetita a partir da precipitação seletiva da DAM e propõe o seu uso em argamassas para blindagem. As amostras produzidas como referência e com a presença do óxido são testadas sob a incidência de raios X e a blindagem de cada uma delas é atribuída através da análise das imagens radiográficas com o software ImageJ.

Desta forma, visa-se avaliar uma alternativa sustentável de um agregado atenuante obtido no tratamento de rejeitos da mineração. Além disso, o seu uso substituirá parte da areia natural, o que pode minimizar custos e impactos ambientais da extração de recursos naturais. E, ainda, para uma aplicação futura, espera-se que o produto atenda as exigências normatizadas para argamassas, produzindo benefícios arquitetônicos pela redução de espessura de parede nas vedações dos ambientes em que são utilizadas energias radioativas, mantidos os mesmos níveis de proteção.



## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

A amostra de Drenagem Ácida de Minas utilizada na pesquisa tem origem em um canal de escoamento próximo do depósito de rejeitos de uma mineradora de carvão no estado de Santa Catarina. Trazida para o laboratório de Materiais de Construção da Faculdade Meridional/IMED, Campus de Passo Fundo, a DAM passou por filtragem, bem como, foi realizada a análise da sua composição química.

### 2.2 Métodos

#### 2.2.1 Obtenção do óxido de ferro magnético

A recuperação do óxido é realizada durante o tratamento por precipitação seletiva da DAM, que se dá através da recuperação do ferro contido na drenagem. A precipitação do ferro ocorre em  $\text{pH } 3,6 \pm 0,1$  pela adição de hidróxido de sódio (NaOH). Em seguida realiza-se a lavagem do lodo de hidróxido de ferro com água, operação necessária para a obtenção de um bom nível de pureza. Posteriormente, faz-se a dissolução do lodo na forma de sulfato férrico pela adição de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Então, coloca-se o material em circulação em coluna contendo uma solução aquosa com pirita, tal processo objetiva a coprecipitação de uma mistura de sais de ferro nas formas  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  em estequiometria 2:1<sup>(19)</sup>. Segue com a adição de hidróxido de sódio (NaOH) até o ajuste de  $\text{pH } 12,0 \pm 0,1$ . Findando o processo, o sistema é agitado constantemente até a conversão em pigmento preto e magnético de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>(15)</sup>. O qual passou por ensaios de caracterização, juntamente da areia, que foram granulometria por peneiramento (de acordo com a NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003)) do qual resultou o diâmetro efetivo da amostra e, através de picnometria, obteve-se a massa específica e a massa específica aparente da areia e da magnetita (conforme NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2003)).

#### 2.2.2 Preparo das argamassas

As argamassas foram produzidas de forma manual no traço 1:3 (aglomerante:agregados), sendo estabelecida a relação água/cimento em 0,55. O cimento utilizado, do tipo CP IV 32 e os agregados



foram areia fina (material passante na peneira de malha 4,75 mm, conforme NBR 7211<sup>(20)</sup>) e pigmento ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) obtido da Drenagem Ácida de Minas.

Foram moldados corpos de prova na dimensão 2x2x1 cm (comprimento, largura e altura, respectivamente), sendo 3 CPs de argamassa de referência (cimento, areia e água) e 3 CPs com a substituição parcial da areia pelo pigmento magnético, na quantidade correspondente a 20% do peso de cimento. Tal valor de substituição deve-se ao fato de que, em estudos prévios utilizando esse percentual, não houve sobra de agregado, sendo todas as partículas envolvidas pela pasta cimentícia, o que parece visível devido à coloração escura (preto) da magnetita. Contudo, este percentual de referência ainda demanda ser avaliado de maneira mais abrangente para determinação do teor ideal de substituição. A mistura foi realizada inicialmente entre cimento, areia e água e depois incorporado o pigmento.

### 2.2.3 Ensaio da atenuação de raios X

A fonte de emissão de radiação foi um aparelho de raios X CMR modelo Spectro 70 X. Todas as irradiações foram realizadas a 60 kV e 10 mGy durante 1 segundo sobre as argamassas de referência e compostas com o pigmento magnético. A avaliação da radiação transmitida ocorreu pela análise dos filmes radiográficos posicionados abaixo das amostras que receberam os feixes de energia.

O modelo de análise adotado foi comparar as escalas de cinza alcançadas pelo exame de raios X utilizando o software ImageJ, uma vez que, pontos mais claros revelados indicam uma maior reflexão, ou seja, maior atenuação de radiação e, pontos mais escuros, uma maior transmissão<sup>(21)</sup>. O software recebeu o carregamento de imagens em alta resolução dos filmes radiográficos e, a partir disso, foi realizada a conversão para escala de cinza e quantificado cada pixel das imagens. Os histogramas obtidos ao final do processo identificaram a média de atenuação das argamassas.

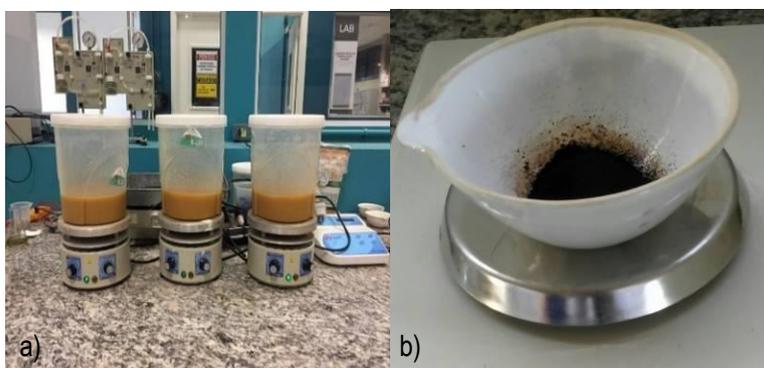


### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Extração do pigmento da DAM

A DAM utilizada na pesquisa apresentou majoritariamente sulfatos (12600 mg/L), ferro nas formas Fe e Fe<sup>3+</sup> (3200 mg/L, cada), alumínio (1269,5 mg/L) e manganês (114,6 mg/L)<sup>(22)</sup>. A recuperação de óxido de ferro a partir da Drenagem Ácida de Minas (Figura 1) resultou em aproximadamente 2g de pigmento por litro.

Figura 1 – a) Drenagem Ácida de Minas. b) Pigmento magnético.



#### 3.2 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados foram quantificados através das suas características granulométricas e de massa. Sendo apresentados na Tabela 1 os valores obtidos de massa específica e massa específica aparente, bem como, o diâmetro efetivo das amostras, que demonstra o pigmento ser mais fino do que a areia, a qual foi substituída por este na quantidade de 20% do peso de cimento.

Tabela 1 – Comparativo da caracterização da areia fina e da magnetita

	Diâmetro efetivo (mm)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Areia Fina	0,15 mm	2,64	1,51
Magnetita	0,075 mm	2,47	1,46



### 3.3 Amostras de argamassas

As argamassas com a presença do óxido de ferro assumiram uma coloração mais escura em relação as de referência (Figura 2). Além disso, ao aproximar um imã sobre os CPs com pigmento percebe-se a força de atração magnética, o que não ocorre com os demais.

Figura 2 – a) Argamassa com pigmento. b) Argamassa de referência.

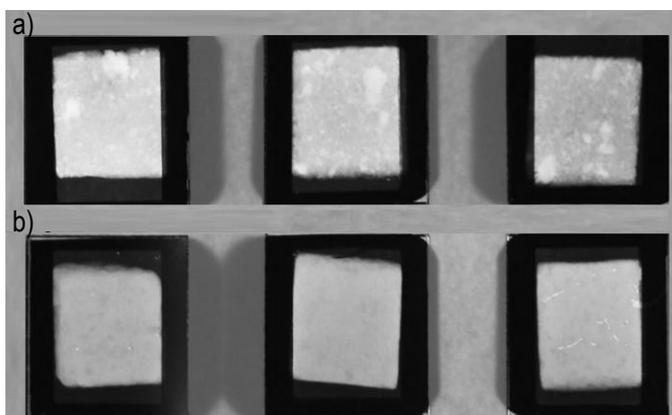


### 3.4 Ensaio da blindagem de raios X

Através do exame de raios X realizado para os corpos de prova 2x2x1 cm (Figura 3), percebe-se um acúmulo de pontos brancos que refletiram mais radiação. De acordo com a escala Hounsfield<sup>(23)</sup> esta característica é observada em elementos metálicos.

Figura 3 – Resultado do exame de raios X

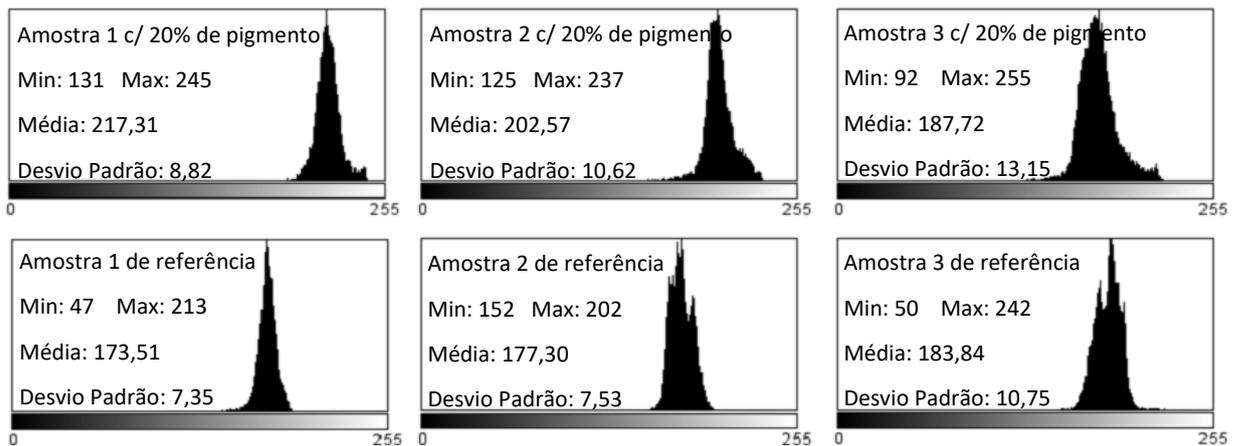
a) Argamassa com pigmento. b) Argamassa de referência.





Utilizando o software ImageJ cada pixel da imagem foi convertido em uma escala de cinza que vai de 0 (cor preta = sem atenuação) até 255 (cor branca = atenuação total). Obteve-se, então, o nível de cinza médio para cada corpo de prova, os quais podem ser observados nos histogramas da Figura 4.

Figura 4 – Resultados com o ImageJ.



De posse destes dados, possibilitou-se o cálculo da atenuação média dos corpos de prova de referência e com pigmento magnético de óxido de ferro extraído da DAM, obtendo-se o ganho de 13% na blindagem de raios X devido a presença do pigmento, pela Tabela 2 pode-se visualizar os resultados do estudo

Tabela 2 – Comparativo da atenuação de raios X das argamassas.

Argamassa	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Com óxido de ferro magnético	217,31	202,57	187,72	202,53
Referência	173,51	177,30	183,84	178,22



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração deste trabalho baseou-se em alguns fatores, dentre eles, a necessidade em diminuir a geração de rejeitos de toda a cadeia produtiva, tratar adequadamente os que não puderem ser evitados, bem como, buscar seu reaproveitamento na forma de produtos.

Como pôde ser visualizado, no tratamento da Drenagem Ácida de Minas, efluente da mineração de carvão que possui alto volume e causa grandes danos ambientais é possível a obtenção de óxidos de ferro. Esta produção caracteriza o produto como de tecnologia embarcada porque além de possuir valor comercial, evita a extração do mineral de depósitos naturais e tem aplicação em outros setores, como na construção civil.

A proposição do uso do óxido foi à composição de argamassa para blindagem de radiação. Sendo, sua aplicação feita em substituição parcial da areia natural, o que reduz os custos e impactos ambientais da produção de agregados. O compósito magnético demonstrou ser um material eficiente para bloqueio de raios X, uma vez que, adquiriu acréscimo de 13% na atenuação em relação à argamassa de referência. Logo, a sua aplicação em revestimentos ajuda a reduzir a espessura de parede necessária para blindagem, mantidos os mesmos níveis de segurança.

Ressalta-se que para validar o uso desta argamassa, a mesma precisa atender parâmetros normativos e apresentar características favoráveis quanto aderência, resistência à tração/flexão, isolamento térmico e acústico, estanqueidade, etc; que não foram avaliados na presente pesquisa.

Contudo, pode-se concluir que a argamassa magnética oferece capacidade de proteção radiológica, podendo resultar em benefícios econômicos e arquitetônicos para os locais em que será empregada, além de reduzir o consumo de minerais e motivar o tratamento da Drenagem Ácida de Minas. Portanto, a argamassa com magnetita DAM traz a sustentabilidade como uma característica intrínseca de sua produção.



## 5. REFERÊNCIAS

1. FRIPP, J. et al. Acid mine drainage treatment. **EMRRP Technical Notes Collection**, mai. 2000.
2. VASQUEZ, Beatriz A. F. **Tratamento secundário de Drenagem Ácida de Mina em banhados construídos e lagoa de polimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
3. HALLBERG, K. B. Biological manganese removal from acid mine drainage in constructed wetlands and prototype bioreactors. **Science of the Total Environment**, v. 338, n. 1-2, p. 115-124, fev. 2005.
4. AMARAL FILHO, Juarez R. do et al. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s.l.], v. 66, n. 3, p.347-353, set. 2013.
5. ALBUQUERQUE, Sérgio M. **Estudo para o desenvolvimento e caracterização de concretos de massa específica elevada para proteção às radiações gama e X**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
6. VOLKMAN, D. E. Concrete for radiation shielding. *In*: Lamond, J. F. Pielert, J. H. (ed.). **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**. Los Alamos: ASTM, 2006. cap. 48, p. 570-577.
7. SANTOS, R. R. SHIELD 1.0: desenvolvimento de um programa de cálculo de blindagem. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 7, n. 2, p. 75-78, 2013.
8. FACURE, A. SILVA, X. A. The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 65, n. 9, p. 1023-1028, set. 2007.
9. OUDA, Ahmed S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. **Housing and Building National Research Center**, v. 11, p. 328-338, 2014.
10. SIKORA, P. et al. The Influence of Nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> on the Microstructure and Mechanical Properties of Cementitious Composites. **Nanoscale Research Letters**, v. 11, p. 182-191, 2016.
11. OTO, B. et al. Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes. **Progress in Nuclear Energy**, v. 92, p. 71-80, 2016.
12. OTO, B; GÜR, A. Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. **International Journal of Physical Sciences**, v. 8, p. 310-314, 2013.
13. CAO, Jingyao; CHUNG, D.d.l.. Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding. **Cement And Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1889-1892, out. 2004.
14. ORTIZ, Nilce. **Estudo da adição de magnetita como material adsorvedor dos metais Cu, Pb, Ni e Cd, em solução**. 2000. – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
15. SILVA, Rodrigo de A. **Recuperação hidrometalúrgica de metais da drenagem ácida de minas por precipitação seletiva**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.



16. SILVEIRA, A.N.; SILVA, R. D. R.; RUBIO, J. Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil: comparative active processes and water reuse. **International Journal of Mineral Processing**, v.93, n.2, p. 103-109, 2009.
17. SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R. M. **Iron Oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization**. 2. ed. [s.l.]: Wiley-vch Verlag GmbH, 2000.
18. TANNER A. O. Iron oxide pigments [Advance Release] Minerals Yearbook 2014. Compiler, USGS, US Dept of the Interior, Washington DC. 2016.
19. WEI, X.; VIADERO, R.C., Synthesis of magnetite nanoparticles with ferric iron recovered from acid mine drainage: implications for environmental engineering, **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 294, n. 1, p. 280-286, 2007.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
21. NARDONE, V. et al. Bone texture analysis using CT-simulation scans to individuate risk parameters for radiation-induced insufficiency fractures. **Osteoporosis International**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.1915-1923, 27 fev. 2017
22. SILVA, Rodrigo de Almeida et al. Synthesis of a Goethite Pigment by Selective Precipitation of Iron from Acidic Coal Mine Drainage. **Mine Water And The Environment**, v. 36, n. 3, p.386-392, abr. 2017.
23. OSBORNEA, T. et al. How to interpret na unenhanced CT Brain scan. Part 1: Basic principles of Computed Tomography and relevant neuroanatomy. **South Sudan Medical Journal**, v. 9, n. 3, p. 1-3, 2016.



## PERMEABILIDADE E MICROSCOPIA DE CONCRETOS COM RESÍDUO DE CORTE DE MARMORE E GRANITO COMO FILLER

Lucas de Sousa Farias Gesta <sup>(1)</sup>; Caio Quaresma Santos <sup>(2)</sup>; Paulo  
Sérgio Lima Souza <sup>(3)</sup>

(1) Universidade Federal do Pará – lucas.gesta@outlook.com; (2) Universidade Federal do Pará –  
eng.caiosantos@gmail.com; (3) Universidade Federal do Pará – pasesliso@ufpa.br

### RESUMO

A elevada finura e o efeito filler nos resíduos de corte de mármore e granitos (RCMG), oriundos de empresas de rochas ornamentais guardam um grande potencial para serem utilizados como adições minerais em substituição ao cimento, no que se refere ao preenchimento da matriz porosa do concreto e das argamassas. Propriedades intrínsecas do concreto, como a permeabilidade são influenciadas diretamente pela porosidade na zona de transição da matriz cimentícia e do agregado. Nas tecnologias atuais, este espaço vazio é preenchido por adições minerais pozolânicas ou inertes (fillers) a fim de se obter a otimização destas propriedades fundamentais. A hipótese da pesquisa se dá na substituição cimento pelo resíduo (RCMG) para se alcançar a colmatação dos microporos do concreto e conseqüentemente diminuir sua permeabilidade. Para isto, o presente trabalho caracterizou o resíduo através de análises granulométricas (Difração a laser), mineralógicas (DRX), químicas (FRX) e morfológicas (MEV) e variou nos teores de 5% e 10% em substituição ao cimento para as idades de 28 e 90 dias. Como variáveis de resposta foram feitos os ensaios de absorção por capilaridade e imersão e análises microscópicas através do MEV. Os resultados mostraram que houve uma menor taxa de absorção e menor índice de vazios com o concreto utilizando 5% de substituição.

**Palavras-chave:** resíduo de corte de mármore e granitos, filler, permeabilidade.

## PERMEABILITY AND MICROSCOPY OF CONCRETE WITH MARBLE AND GRANITE CUTTING WASTE AS FILLER

### ABSTRACT

The high fineness and filler effect in the marble and granite cutting waste (MGCW) from ornamental stone companies have great potential to be used as mineral additions in substitution of cement, as far as filling the interfacial transition zone (ITZ) of the concrete and mortars. Intrinsic properties of concrete such as permeability are directly influenced by porosity in the ITZ of the cementitious matrix and the aggregate. In current technologies, this void is filled by mineral additions (fillers) in order to obtain the optimization of these properties. The research hypothesis is based on the substitution of cement by the residue (MGCW) in order to reach the micropore densification of the concrete and consequently to decrease its permeability. For this, the present work characterized the residue by means of granulometric analyzes (mineral diffraction), mineralogical (XRD), chemical (FRX) and morphological (SEM) and varied in the contents of 5% and 10% replacing the cement for the ages of 28 and 90 days. As variables were the capillary absorption and immersion tests and microscopic analysis through the SEM. The results showed that there was a lower absorption rate and lower void index with the concrete using a 5% substitution.

**Key-words:** marble and granite cutting waste, filler, permeability.



## 1. INTRODUÇÃO

Na composição do concreto, seja convencional, seja especial, o insumo de maior custo e de maior potencial poluente é o cimento. De produção em larga escala, o custo excessivo e a alta emissão de CO<sub>2</sub> para a produção do clínquer (principal constituinte para propriedades básicas do cimento portland como resistência mecânica) torna necessária a obtenção de meios alternativos para viabilizar economicamente e ambientalmente a sua produção e utilização na indústria da construção.

As adições minerais foram aprimoradas e utilizadas na melhoria de propriedades intrínsecas do concreto, tanto para características mecânicas quanto para a durabilidade. Usualmente obtidas pela geração de resíduos industriais e agrícolas, as adições possuem papel fundamental na composição dos concretos do século XXI, podendo ter várias funções e classes como as adições pozolânicas, cimentantes e os fillers. Em geral, dos diversos tipos de resíduos trabalhados e descobertos pela comunidade científica, o resíduo do corte de rochas ornamentais, principalmente mármore e granitos tem se mostrado uma alternativa como potencial adição mineral e diminuição do impacto ambiental causado pelo consumo de matéria prima natural.

Para a produção do corte de rochas ornamentais, cerca de 25% do produto é pó que posteriormente se torna lama que contribui para a poluição de áreas do meio ambiente como rios, devido à falta de destino para descarte do material pelas empresas<sup>(1)</sup>. Dados como quantidades de resíduos são incalculável visto a falta de monitoramento de órgãos públicos responsáveis pela sua destinação. No Brasil, as produções das rochas, em maior parte, se concentram no estado do Espírito Santo e então, destinadas a todo o resto do território.

Ambientalmente, quando resíduos industriais são reciclados, não somente a emissão de CO<sub>2</sub> é reduzida, mas outros resíduos são realocados como materiais e mais recursos naturais são preservados<sup>(2)</sup>.

O efeito do pó de mármore e granito já é estudado há algumas décadas por pesquisadores nacionais e internacionais. Sua aplicação pode ser dada tanto como adição mineral pela substituição do cimento quanto na substituição de agregados (areia). Um estudo<sup>(3)</sup> que trabalhou com o resíduo de mármore e granito em substituição ao cimento obteve aumento de resistência à compressão axial de 23% aos 28 dias com faixas de 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, e 15. Outros diversos trabalhos<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup> também obtiveram acréscimo de resistência, tanto por compressão axial, quanto por tração na flexão, com a substituição parcial do cimento pelo RCMG, tendo como sua melhor faixa de



substituição em torno de 5% a 7%. É importante ressaltar que a maior parte destes trabalhos identificou que este resíduo possui propriedades de *filler*, ou seja, de alta finura para o preenchimento dos poros das matrizes e na zona de transição, não tendo então atividade pozolânica <sup>(4)</sup> <sup>(6)</sup>. Além disso, um dos autores afirma que o teor de 5% de substituição é ótimo, pois além do acréscimo na resistência mecânica, há também o refinamento da matriz cimentícia e, conseqüentemente, a diminuição da porosidade. Outros trabalhos internacionais mostram a relação de sustentabilidade do uso do resíduo <sup>(7)</sup> onde, por meio de procedimentos experimentais, o melhor teor de substituição do cimento seria de 10% tanto para o aumento da resistência quanto para a redução de 12% do CO<sub>2</sub> pela produção do clínquer. O concreto com substituição pelo resíduo se apresentou mais denso e menos poroso, além disso, para a relação água/cimento de 0,4 a 0,5, há a efetivação do efeito *filler* do resíduo devido ao melhoramento na zona de transição, do que em relações a/c mais altas <sup>(1)</sup>.

Algumas pesquisas nacionais também já trabalharam com o RCMG na sua composição, na qual há certas controvérsias onde trabalhos de substituição do resíduo geraram diminuição nas propriedades mecânicas <sup>(8)</sup> e outros que mostraram acréscimo de resistência com até 5% de substituição e com relações água/cimento em torno de 0,5 <sup>(9)</sup>.

A definição de durabilidade, segundo a Norma Brasileira <sup>(10)</sup>, é a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais. Logo, o processo de deterioração do concreto é resultado de ações químicas e físicas, como o ataque por sulfatos, ácidos, entre outros. Todos esses processos envolvem o fenômeno de transporte pelas estruturas de poros, o ambiente em que a estrutura está inserida, a qualidade e a proporção dos materiais utilizados, ou seja, a durabilidade do concreto é função da permeabilidade do mesmo, uma vez que a entrada de água e dos agentes deletérios citados iniciam os processos de deterioração <sup>(11)</sup>.

O presente trabalho avaliou as características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas do resíduo de mármore e granito (RCMG) comparando-o com a do cimento utilizado e analisou seu desempenho em substituição ao próprio cimento em faixas de 5 e 10% em massa no concreto. O trabalho enfatizou no estudo da permeabilidade deste concreto, por meio dos ensaios de absorção por imersão e absorção por capilaridade e estudos microscópicos com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).



## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Caracterização e obtenção dos materiais

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI RS) de massa específica de  $3,09 \text{ g/cm}^3$  <sup>(12)</sup>, sendo escolhido por ser, majoritariamente, composto por clínquer e sem adições que possam afetar na análise do resíduo. Além disso, foi feita a granulometria a laser para caracterizar e servir de referência a substituição compatível (de mesma granulometria) do resíduo pelo cimento.

O agregado miúdo utilizado é uma areia quartzosa proveniente dos rios da cidade de Belém, de massa específica de  $2,70 \text{ g/cm}^3$ , tendo módulo de finura igual a 0,95 e dimensão máxima característica de 2,4 mm. <sup>(13)</sup>

O agregado graúdo natural foi utilizado foi a brita de origem granítica proveniente do município de Tracuateua (PA) de massa específica de  $2,84 \text{ g/cm}^3$  e dimensão máxima característica de 25 mm. <sup>(14) (15)</sup>

O RCMG foi recolhido em forma de lama, ou seja, o pó umedecido no processo de corte, de duas empresas de rochas ornamentais, como mostrado na Figura 4. Posteriormente, foi colocado em estufa à temperatura de  $105^\circ \text{ C}$  e resfriado à temperatura ambiente, e logo após, peneirado na peneira de malha #200 até o recolhimento do material passante, fino, a ser utilizado na substituição do cimento (Figura 1 e 2).

Figura 1,2 - Obtenções do Resíduo do Corte do Mármore e Granito (RCMG). 1) Em forma de lama na máquina de corte; 2) Seco e Peneirado para o uso no concreto; Fonte: Autores.

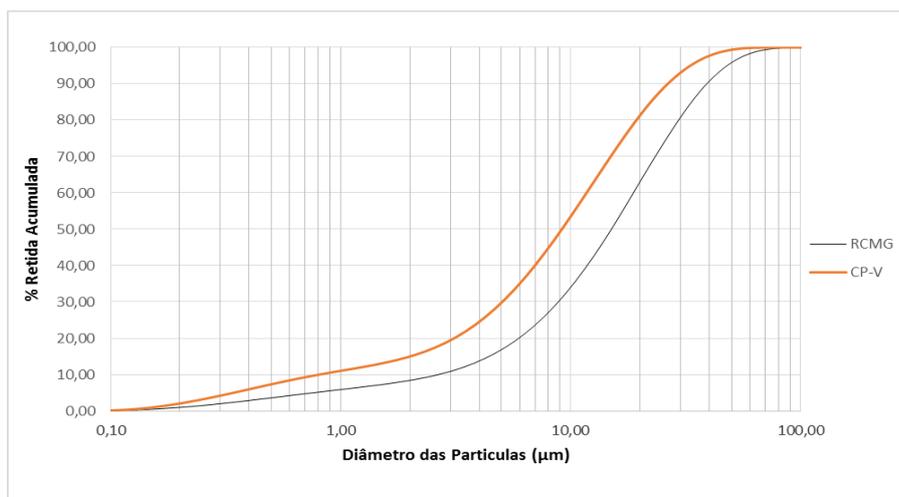


Para a caracterização física do resíduo, sua massa específica é de  $2,75 \text{ g/cm}^3$  e sua finura, pela peneira #200 de 17% <sup>(16)</sup>. Assim como o do cimento, foi feita a granulometria a laser de ambos os



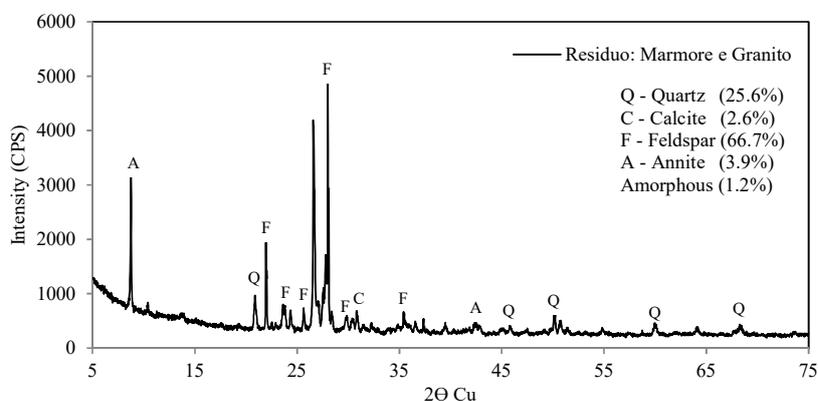
materiais para a comparação e constatação da finura do material, característica imprescindível para um filler como é mostrado na Figura 3, em que há certa proximidade entre o diâmetro dos grãos dos materiais, embora o cimento seja ligeiramente mais fino que o resíduo, 50% de seus grãos são inferiores a 20  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, atendendo requisitos da norma NBR 12653 (2014) para uso como adição mineral (17).

Figura 3 - Curvas Granulométricas por difração a laser do cimento e do RCMG. Fonte: Autores.



Na caracterização mineralógica, com a análise da difração de raios-X, identificamos as fases cristalinas do material. Na figura 4, O difratograma de Raios-X mostra como o resíduo possui pontos de picos de minerais cristalinos de Feldspato e Quartzo, além dos minerais presentes da rocha originária e pouco percentual de sílica amorfa (*Amorphous*), também sem a presença do halo amorfo, logo, possivelmente a quantidade de sílica amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) não é suficiente para apresentar uma possível atividade pozolânica.

Figura 4 - Difratograma de Raio-X do RCMG; Fonte: Autores.



A composição e caracterização química foram determinadas utilizando o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X como é mostrado na Tabela 1. Os resultados mostram que o maior



composto do resíduo é o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), sendo em torno de 61,88% de sua composição, seguido por 13,79% e 7,71% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , respectivamente, sendo componentes dos minerais de Feldspato e Quarzo, mostrados no DRX. Os resíduos atendem a exigência química da NBR 12653 (2014) <sup>(17)</sup> para a caracterização de material pozolânico ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ ), porém, não apresenta atividade pozolânica justamente pelos minerais já se encontrarem cristalizados, sem a possibilidade de reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

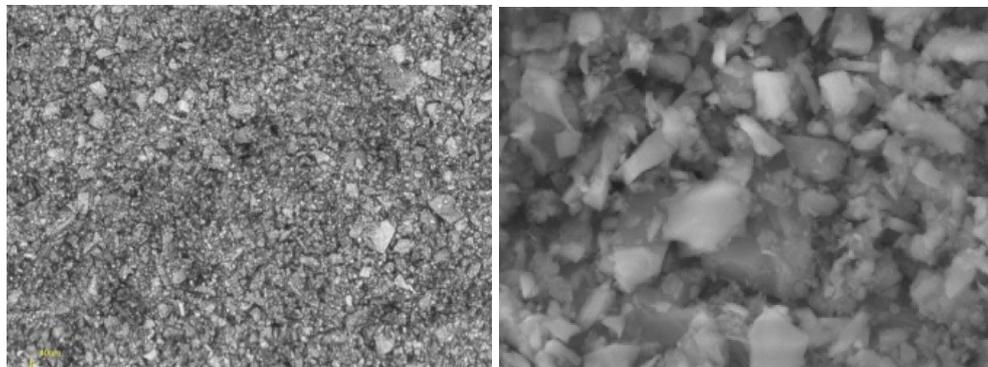
Tabela 1: Composição química dos resíduos e do cimento através da Fluorescência de Raio-X (FRX).

Composição Química	Teores (%)	
	Cimento CP-V	RCMG
$\text{SiO}_2$	19,32	61,88
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,91	13,79
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,02	7,71
CaO	64,85	6,58
$\text{K}_2\text{O}$	0,75	5,04
$\text{TiO}_2$	0,00	1,48
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,00	0,84
MgO	0,69	0,38
$\text{NaO}_2$	0,00	0,28
$\text{SO}_3$	2,75	0,20
MnO	0,00	0,13
$\text{CO}_2$	0,00	1,48
Demais	0,00	0,21

A caracterização morfológica foi feita através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e está apresentado na Figura 4 e 5. Como pode ser observado, o resíduo possui formato poligonal e arestas definidas, podendo melhor disseminação pelos poros.



Figura 4 e 5 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 1) 2500X de ampliação; 2) 5000X de ampliação; Fonte: Autores.



O aditivo usado para dar maior plasticidade ao concreto, visto que foi utilizada baixas relações a/c, foi o superplastificante Sikament de 3ª geração.

## 2.2. Dosagem e produção dos concretos

Como variáveis controláveis ou independentes são:

- a. Teor de adição do resíduo (RCGM) em relação ao cimento. Variações de 0% (referência), 5% de adição e 10% de adição visando verificar qual proporciona o melhor desempenho.

E como variáveis de resposta, o enfoque foi nos ensaios que mostrem como a porosidade do concreto irá influenciar nas propriedades de permeabilidade. Estes são:

- a. Absorção por Imersão: Para analisar a permeabilidade geral do concreto.
- b. Absorção por Capilaridade: Para analisar a permeabilidade pelos poros capilares.

Além destas variáveis de resposta é importante também analisar o efeito do *filler* na microestrutura do concreto, tanto no concreto com brita quanto no concreto com agregado reciclado (o mais poroso), então é necessário se fazer uma Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para fazer essa constatação.

Para a elaboração do concreto, o método de dosagem empregado foi o do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP) <sup>(18)</sup>. Foi fixado um teor de argamassa  $\alpha = 51\%$  e fixadas as relações a/c para os traços com brita de 0,46. Foi escolhido relações baixas em virtude dos trabalhos (1) mostrarem que o acréscimo de resistência se dá com relações baixas, em torno de 0,5. É mostrado na Tabela 2, o consumo dos materiais utilizados e suas proporções.



Tabela 2: Dosagem e consumo dos materiais.

Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	AGRC (Kg)	RCGM (Kg)	Água (Kg)
447,25	639,57	1042,09	-	-	205,74
424,89	639,57	1042,09	-	21,24	205,74
402,53	639,57	1042,09	-	44,73	205,74

### 3.3. Metodologia

No Slump Test, o abatimento foi fixado um valor de  $100 \pm 10$  mm. Para os concretos com brita, o traço de referência (0%), traço com 5% e traço com 10%, o abatimento foi de 95mm, 90mm e 100mm, respectivamente.

Já para os concretos com agregado reciclado, o traço de referência, traço com 5% e traço com 10%, o abatimento foi de 100mm, 110mm e 110mm, respectivamente. Foi observada também a contribuição de acordo com a inclusão do resíduo no aumento da coesão e a diminuição da exsudação do concreto, confirmando as características da adição de adições minerais.

A moldagem seguiu a NBR 5738 (2015) <sup>(19)</sup> onde foram moldados, para cada família, ou seja, para cada traço, três exemplares de 100x200. Foram retirados após 24 horas e curados seguindo também a NBR 5738 (2015) <sup>(19)</sup> por 28 dias e 90 dias. Após o processo de cura, foram feitos os ensaios de Absorção por imersão pela ABNT NBR 9778 (2005) <sup>(20)</sup> e Absorção por capilaridade pela ABNT NBR 9779 (2012) <sup>(21)</sup>.



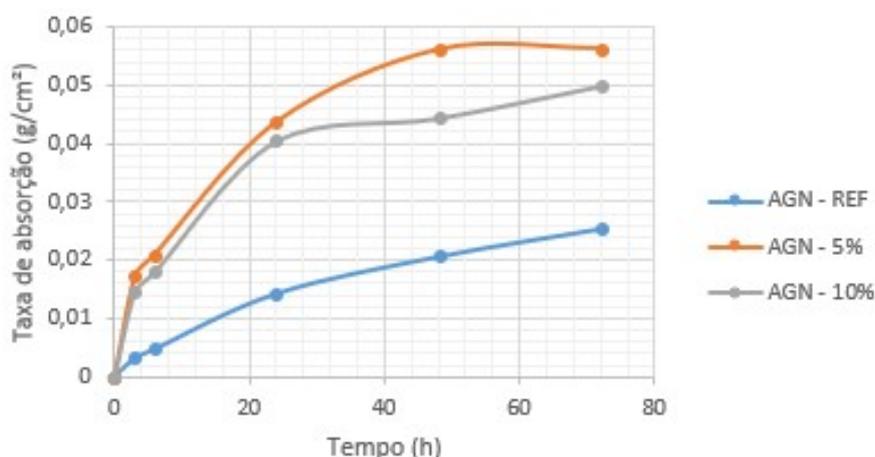
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Permeabilidade

Para as misturas produzidas, como mostra a Figura 6, os valores de absorção foram de 5,4%, 4,4% e 4,1% para os teores de substituição de 0, 5 e 10%, respectivamente podendo ser um primeiro sinal de densificação do concreto com a substituição do cimento pelo resíduo podendo ter contribuído na interrupção da conectividade entre os poros e interrompendo o transporte de água no concreto.

Com isso, é estabelecido parâmetros pioneiros de classificação dos concretos de acordo com a absorção de água, onde concretos com absorção superior a 6,3% são concretos deficientes e, portanto, devem ser dosadas e produzidas de modo a reverter essa característica <sup>(22)</sup>. Diante disso, pode destacar que tanto a mistura com o RCMG quanto a de referência se enquadram como concreto durável, pois apresenta absorção total inferior a 6,3%, sendo a maior absorção a de 5,4%. A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de absorção por capilaridade, é possível notar que nos traços o teor 5% de RCGM apresentou uma taxa de absorção maior que os demais, sendo o traço de referência o que apresentou os menores valores.

Figura 7 - Resultados de absorção por capilaridade para concretos.



No entanto, os traços de referência apresentaram as menores taxas de absorção, portanto, de um modo geral, a utilização de RCGM aumentou a taxa de absorção dos concretos produzidos, devido ao incremento de finos causarem um refinamento de poros da estrutura, formando caminhos preferencias, favorecendo a absorção capilar <sup>(11)</sup>.

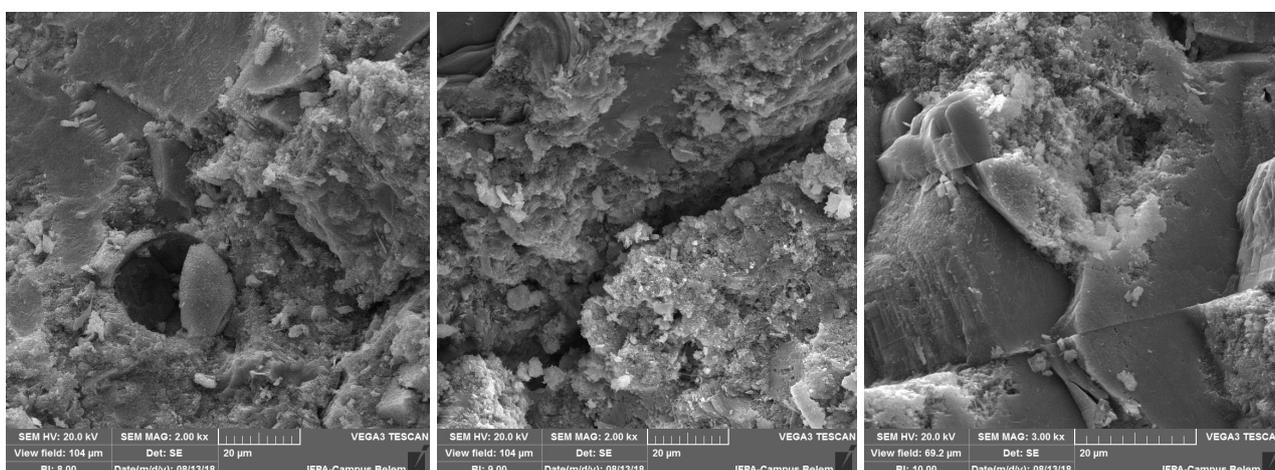


Com isso, no concreto endurecido, a presença de materiais finos pode ser benéfica para concretos com baixas resistências. Já para concretos de elevada resistência este efeito pode ser adverso, como os concretos produzidos com resistência superiores a 40 Mpa, pode assumir essa hipótese para justificar a baixa contribuição do RCMG na absorção por capilaridade dos concretos produzidos<sup>(11)</sup>.

### 3.2. Microscópio Eletrônico de Varredura

A análise da Microscopia (MEV) nos permitiu analisar e observar a morfologia dos concretos produzidos com o RCMG, tanto para os concretos convencionais quanto para os concretos reciclados. Durante este ensaio visual, a espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foi utilizada para confirmação da presença do resíduo (RCMG) nas amostras com a verificação de seus componentes químicos revelados no EDS. O MEV utilizado foi o modelo VEGA 3 LMU da TESCAN e o SISTEMA DE MICRO-ANÁLISE - EDS, modelo AZTec Energy X-Act, resolução 129eV, marca Oxford.EDS, feitos no Instituto Federal do Pará (IFPA).

Figura 7, 8, 9 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). 7) Referência – 0% de RCMG; 8) 5% de RCMG; 9) 10% de RCMG. Fonte: Autor.



Na Figura 7, 8 e 9 é perceptível, a maior presença de resíduo (RCMG) proporcionalmente ao seu acréscimo, 5% e 10%. Logo, conforme há o aumento de RCMG, sua microestrutura fica mais densa e, com a análise do EDS, se pode perceber a distribuição do resíduo em toda o concreto, sendo mais preciso na zona de transição e nos poros isso contribuindo para uma menor absorção total como mostrado no ensaio de absorção. Porém o resíduo não impediu dos poros estarem interconectados influenciando assim na sucção capilar do concreto.



## 4. CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado e dos resultados obtidos nos ensaios de absorção por imersão e capilaridade, pode-se elencar as seguintes conclusões:

- Por meio do ensaio de absorção por imersão, foi constatado que a natureza porosa do agregado reciclado promove maior absorção do concreto produzido com o mesmo. Observou-se também que o aumento do teor de RCGM promove colmatação dos poros não conectados e gerais diminuindo a absorção total do concreto
- No ensaio de imersão por capilaridade, percebeu-se que os maiores níveis de taxa de absorção foram dos concretos produzidos com teor de RCGM de 5%.

A análise das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas deste resíduo nos permitiu avaliar e caracterizar este resíduo como uma adição mineral inerte, ou seja, um *filler*. Sua granulometria e finura semelhantes ao do cimento Portland colaboraram para o efeito de preenchimento dos poros da zona de transição e sua densificação.



## 5. REFERÊNCIAS

1. ALIABDO, A.A., ABD ELMOATY, ABD ELMOATY M., AUDA, E.,M., 2014. **Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete.** Constr. Build. Mater. 50, 28e41.
2. METHA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades Materiais.** Editora Nicole Pagan Hasparyk, 2º Edição, 2014.
3. SOLIMAN, N.M., 2013. **Effect of using marble powder in concrete mixes on the behavior and strength of R.C. slabs.** Int. J. Curr. Eng. Technol. ISSN: 2277-4106 3 (5), 1863e1870.
4. ERGÜN, A., 2011. **Effects of the usage of diatomite and waste marble dust as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete.** Constr. Build. Mater. 25 (2), 806e812
5. SHIRULE, P.A., RAHMAN, A., GUPTA, R.D., 2012. **Partial replacement of cement with marble dust powder.** Int. J. Adv. Eng. Res. Stud. ISSN: 2249-8974 1 (3), 175e177.
6. CORINALDESI, V., MORICONI, G., NAIK, T.R., 2010. **Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete.** Constr. Build. Mater. 24 (1), 113e117
7. AREL. H. S. 2016. **Recyclability of waste marble in concrete production.** Journal of Cleaner Production. 131 (2016) 179e188.
8. LOPES, J. L. M. P., BACARJI, E., FIGUEIREDO, E. J. P., RÊGO, J. H. S., PEREIRA, A. C. **Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como filer, na produção de concreto.** Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão da UFG, 2006.
9. ALVES, M.S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos.** 2008. 133f. Dissertação (mestre em engenharia civil).
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento.** Comitê: ABNT/CB-018. Rio de Janeiro, 2014.
11. GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 2000.135f. Dissertação (mestre em engenharia civil).
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23. **Cimento Portland e outros materiais em pó.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2000.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2009.



14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2009.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2006.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23. **Cimento Portland e outros materiais em pó.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2000.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 126553 - **Materiais Pozolânicos - Requisitos** – Rio de Janeiro, 2014.
18. HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini, 1993.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738. **Concreto- Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2015.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Comitê: ABNT/CB-018. Rio de Janeiro, 2005.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Rio de Janeiro, 2012.
22. HELENE, P.R.L. **La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón.** Hormigón, AATH, n. 10 p. 25035, ago. Buenos Aires. 1983.



## PRODUÇÃO DE ARGAMASSA AUTONIVELANTE COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇUCAR

**Gustavo Calza<sup>(1)</sup>; Bruno Marangoni <sup>(2)</sup>; Gabriel Dalla Vechia <sup>(3)</sup>; Gabriela Caron<sup>(4)</sup>; Suelen Vanzetto<sup>(5)</sup>**

(1) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [gustavo.calza@hotmail.com](mailto:gustavo.calza@hotmail.com)

(2) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [b\\_marangoni@outlook.com](mailto:b_marangoni@outlook.com)

(3) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [gabriel\\_ldv@hotmail.com](mailto:gabriel_ldv@hotmail.com)

(4) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [gabrielamcaron@hotmail.com](mailto:gabrielamcaron@hotmail.com)

(5) Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – [suelen.van@hotmail.com](mailto:suelen.van@hotmail.com)

### RESUMO

As indústrias cimenteiras são responsáveis por cerca de 5% da emissão global de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado anualmente para atmosfera. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) se mostra com efeito pozolânico, característica ideal para ser um substituto parcial conveniente ao cimento Portland. Considerando isso, esta pesquisa buscou avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland em argamassas autonivelantes. As substituições empregadas foram nas percentagens de 3%, 5% e 10% de substituição do cimento Portland CP II-Z-32 pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Para avaliar as propriedades da argamassa realizou-se ensaios de tempo de fluxo e consistência no estado fresco e ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade no estado endurecido. Sendo assim, os resultados obtidos apontam para um teor ótimo de substituição contendo 10% de CBCA, comprovando a viabilidade do uso da cinza em argamassas autonivelantes.

**Palavras-chave:** Cinza. Bagaço da cana-de-açúcar. Argamassa. Argamassas autonivelantes.

### PODUCTION OF SELF-LEVELING MORTAR WITH PARTIAL REPLACEMENT OF THE PORTLAND CEMENT BY GRAY OF SUGARCANE BAGASSE ASH

The cement industries generate approximately 5% of the global emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) released annually into the atmosphere. Sugarcane bagasse ash (SCBA) is shown to have a pozzolanic effect, an ideal feature to be a convenient partial substitute for Portland cement. Thus, this research sought to evaluate the feasibility of partial substitution of Portland cement in self-leveling mortars, an innovative underlayment system composed of high-performance. The substitutions (sugarcane bagasse ash) were applied in percentages of 3%, 5% and 10% as a replacement of the Portland cement CP II-Z-32. To evaluate the properties of the mortar the following test were utilized: flow time and consistency in fresh state and compressive strength, elasticity modulus and water absorption by capillarity in the hardened state. To such a degree, the obtained results point to an optimum substitution content containing 10% of SCBA, proving the feasibility of the use of ash in self-leveling mortars.

**Key-words:** Ash. Sugarcane bagasse. Mortar. Self-leveling mortars.



## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de geração e desenvolvimento de novos materiais e tecnologias acompanha a humanidade há milhares de anos. Esse desenvolvimento busca sempre melhorar as condições de vida e trabalho para o homem, especialmente no ramo da construção civil, onde muitas das evoluções significativas foram ganhando espaço e sendo incorporados aos costumes.

No Brasil, de tudo que é extraído da natureza, entre 20% e 50% das matérias-primas naturais são de responsabilidade da construção civil, que se caracteriza como um dos setores que mais consomem recursos naturais <sup>(1)</sup>. Outro ponto a ser destacado é que a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO<sub>2</sub>, proveniente do processo de clínquerização, no qual para cada tonelada produzida, são gerados 600kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) <sup>(2)</sup>.

A procura por alternativas de utilização de resíduos industriais tornando-os subprodutos e ainda agregar valor, tornou-se uma busca incessante de todas as cadeias produtivas. Na construção civil, a opção de se reutilizar resíduos de outras indústrias como matéria-prima, pode ser uma possibilidade atraente, pois pode gerar redução de gastos financeiros e de impactos ambientais. Nesse contexto, há um grande interesse de tais materiais alternativos que demandam menor energia e liberam menos CO<sub>2</sub> para a atmosfera, em substituição ao cimento Portland.

O bagaço da cana-de-açúcar há décadas atrás era considerado um problema ambiental, onde seu destino principal era para alimentação de animais em confinamentos, porém com uma demanda muito baixa. Nos dias de hoje esse cenário mudou, e este resíduo passou a ser uma importante fonte de geração de renda e energia elétrica. Contudo, com a queima, outros resíduos passaram a ser gerados, como os gases lançados pela combustão e as cinzas geradas que só aumentam o volume nos pátios das usinas.

A queima do bagaço de cana-de-açúcar, que é um subproduto, induz à geração de cinzas, introduzindo mais um resíduo na cadeia produtiva. Como a quantidade de bagaço queimado nas caldeiras são enormes, a quantidade de cinzas que são geradas é por volta de 25kg para cada tonelada de bagaço incinerado. Uma parte dessa cinza volta para o solo dos canaviais como forma de adubo. No entanto, não possuindo outra forma de utilização, a maior parte desse resíduo é destinada aos aterros sanitários. Mas, segundo 15 estudos realizados, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) apresenta atividade pozolânica, característica que possibilita o uso na substituição parcial do cimento Portland em argamassas, ou até mesmo, como substituto de agregados miúdos.

A construção civil no Brasil, tem experimentado o desenvolvimento de novas tecnologias, dentre essas novas tecnologias em fase de implantação, observa-se um crescimento na utilização de contrapiso executado com



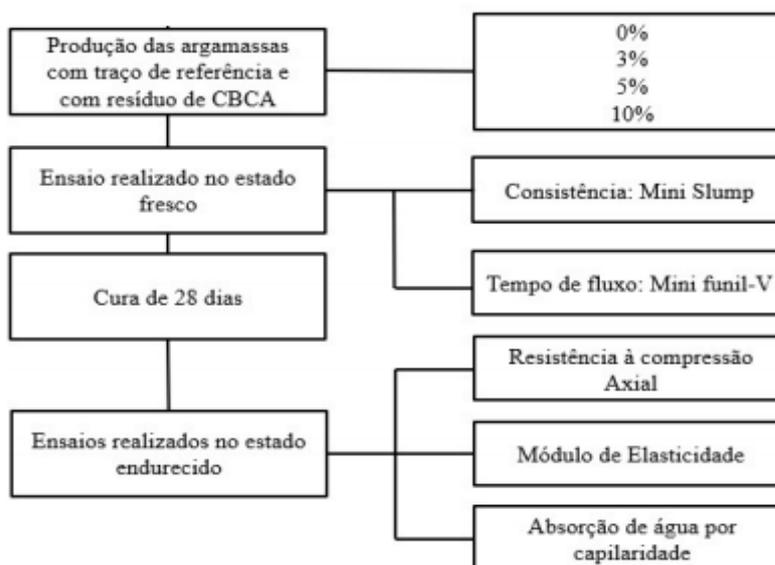
argamassa fluida, denominado como “contrapiso autonivelante”, que tem como intuito uma futura substituição da argamassa do tipo “farofa”. A sua aplicação é por meio de um sistema bombeável e seu principal objetivo é a regularização dos pisos, preencher espaços vazios e se autoadensar apenas sob efeito da gravidade.

O presente trabalho avalia uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pela disposição inadequada de resíduos no ambiente, uma alternativa é a utilização do resíduo da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) para a fabricação de argamassa autonivelante, em substituição parcial do cimento Portland.

## 2. METODOLOGIA

O detalhamento do programa experimental encontra-se na Figura 1, a qual apresenta os percentuais de substituição do cimento Portland por resíduo de CBCA.

Figura 1 - Programa Experimental



### 2.1. Materiais Utilizados

O Cimento Portland Composto com adição de pozolana CP II-Z-32 e massa específica de 2,95, que foi utilizado neste trabalho, foi selecionado pela sua versatilidade e trabalhabilidade em diversas aplicações, sendo um dos cimentos mais utilizados no Brasil, pois suas propriedades atendem desde estruturas de concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento.

O agregado miúdo que foi utilizado neste trabalho consiste em uma areia fina natural de origem quartzosa, chamada comercialmente de areia fina. A média da massa retida acumulada do agregado miúdo atende as especificações da distribuição granulométrica prescrita na norma <sup>(3)</sup>. O agregado miúdo apresentou módulo de finura igual a 1,90, e dimensão máxima característica de 1,18 mm. Quanto às demais



características, apresentou massa específica de 2,62 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1,59 g/cm<sup>3</sup> e índice de absorção de água igual a 0,80 %.

O resíduo da cinza da queima do bagaço da cana-de-açúcar utilizado neste trabalho provém de uma cachaçaria, o processo de secagem foi realizado em estufa na temperatura de 100°C no período de 24 horas. Em seguida, a cinza passou por um processo de moagem no Moinho de Bolas, por cerca de 6 horas, visto que inicialmente com o tempo de 2 horas no moinho de bolas a porcentagem retida na peneira # 200µm era de 27,33%, necessitando de mais tempo para diminuir esse valor e se aproximando aos 1,51% do cimento. Com 6 horas de moagem constatou-se que não havia necessidade de peneiramento devido à grande quantidade de matéria fina obtida. A massa específica da CBCA foi de 2,64, e o índice de atividade pozolânica foi de 67% ao qual a norma ASTM 618 (2015), indica que para o material ser pozolânico os valores tem que ser acima de 70%.

## 2.2. Dosagem Experimental

As argamassas foram produzidas no traço definido 1:2 (aglomerante: agregado) convertido em volume. Além do traço de referência, foram substituídos em volume os teores de 3, 5 e 10% do cimento por resíduo da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. A tabela 1 demonstra a quantidade de material adotado para cada teor.

Tabela 1 - Quantidade de material utilizado

<b>Teor de substituição (%)</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
<b>Cimento (kg)</b>	1,440	1,396	1,368	1,296
<b>Gesso em pó (kg)</b>	0,160	0,160	0,160	0,160
<b>Areia (kg)</b>	1,920	1,920	1,920	1,920
<b>Pó calcário (kg)</b>	1,280	1,280	1,280	1,280
<b>Incorporador de Ar (%)</b>	0,30	0,30	0,30	0,30
<b>Superplastificante (%)</b>	1,69	1,65	1,65	1,65
<b>Cinza (kg)</b>	0	0,0432	0,072	0,144
<b>Relação água/aglomerante</b>	0,46	0,46	0,46	0,46

A ordem em que a mistura dos materiais foi realizada é notável no resultado da ativação alcalina, em um misturador planetário, adiciona-se o cimento, gesso em pó, pó calcário e a cinza durante 1 minuto, após, adiciona-se areia misturando-se por mais 30 segundos, após este tempo foram acrescentados os líquidos (aditivos e água), misturando-se por mais 5 minutos <sup>(4)</sup>.



Os corpos de prova foram moldados em camada única, após  $48 \pm 24$  horas, foi realizada a desforma dos corpos de prova, os quais foram dispostos na câmara úmida para o processo de cura aos 28 dias. No total foram necessários 40 corpos de prova de argamassa para a realização dos ensaios.

Para avaliar as propriedades da argamassa no estado fresco, foram realizados dois ensaios, consistência e tempo de fluxo respectivamente. Esses ensaios servem para verificar se a argamassa apresenta fluidez suficiente para ser denominada autonivelante.

O ensaio de resistência à compressão é um dos principais requisitos para a produção de argamassas, se refere a capacidade do elemento em resistir aos esforços sem entrar em ruptura <sup>(5)</sup>. No Modulo de Elasticidade o objetivo é o entendimento entre a tensão e a deformação, e a verificação da máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformações permanentes.

A Absorção de Água por Capilaridade é importante para avaliar o comportamento do revestimento à água e para avaliar a durabilidade dos materiais a base de cimento. Quando um material possui valores baixos de absorvidade pode-se dizer que possui uma melhor qualidade <sup>(12)</sup>.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Consistência Média e Tempo de Fluxo

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado endurecido, a fim de verificar a viabilidade de utilização da cinza da queima do bagaço da cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento Portland na confecção de argamassas autonivelantes. Os valores obtidos pelos ensaios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Ensaio no estado Fresco

<b>Teor de substituição (%)</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
<b>Consistência média 375 ± 15 (mm)</b>	368,0	376,6	375,0	386,6
<b>Tempo de fluxo médio 6 a 12 (segundos)</b>	5,78	5,97	4,75	7,20

Analisando a tabela 2, para o ensaio de consistência é possível observar que os resultados de todos os teores estão em conformidade com a norma, atingindo valores de espalhamento ideais. Para o ensaio de tempo de fluxo, o teor de 10% é o único que está em conformidade com a norma. Para os teores de 0%, 3% e 5% as argamassas autonivelantes atingiram uma fluidez maior, por apresentar menores tempos de queda.

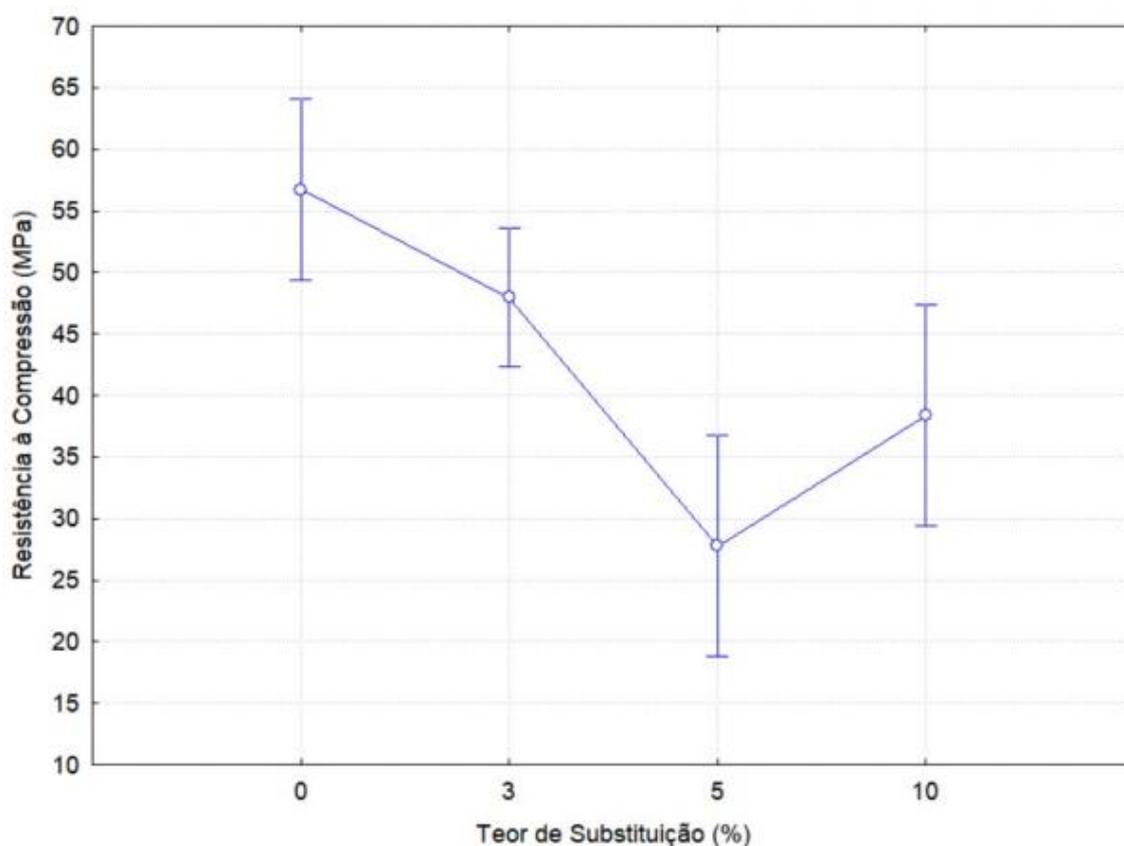


### 3.2. Resistência a Compressão Uniaxial

Para obter maior precisão dos valores apresentados, foi realizado um tratamento estatístico dos dados, para a retirada de valores considerados espúrios do experimento, para que não houvesse uma análise equivocada dos dados.

A Figura 2 mostra a influência que ocorre na resistência à compressão das argamassas, com a substituição parcial do cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar, a partir da análise estatística (ANOVA).

Figura 2 – Influência do teor de substituição sobre a resistência a compressão



Compreende-se por meio do gráfico da Figura 2 e do teste Tukey, que o teor de 3% com 47,97 MPa, obteve valor próximo da referência com 56,73 MPa, sendo estatisticamente iguais. Já o teor de 5% com 27,79 MPa, teve decréscimo significativo em comparação à referência, apresentando menor resistência à compressão. Observa-se que o aumento nas porcentagens de CBCA proporcionou decréscimo na resistência à compressão para os teores de 3%, 5% e 10%, nos valores de 15,44%, 51,01% e 32,33% respectivamente, comparando ao valor de referência.



Embora houve decréscimo nos valores de resistência, ainda assim esses resultados são considerados satisfatórios por atingir uma resistência acima dos 20 MPa, isso é explicado pelo fato das argamassas terem uma relação a/c baixa de 0,46. Conforme <sup>(6)</sup>, em sua pesquisa apresentou um aumento no fator a/c até 1,26, conseqüentemente, atingiu valor de 19 MPa de resistência à compressão.

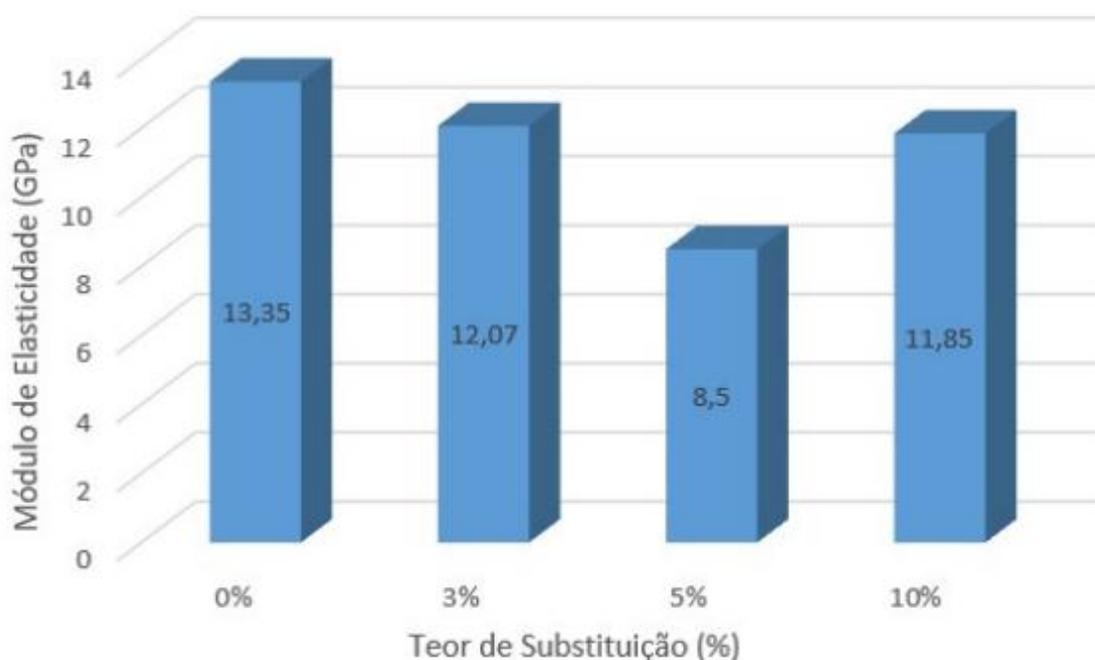
De acordo com <sup>(7)</sup> a adição de alguns aglomerantes não gera aumento significativo na resistência do material com o passar da idade. Já <sup>(8)</sup> explicam que o ganho de resistência pode ocorrer por causa da redução da água de amassamento necessário nas misturas, causada em virtude das propriedades plastificantes desses materiais.

Em seus estudos, <sup>(9)</sup> observou que dentre os fatores intrínsecos ao material argamassa e concreto, a relação a/c está entre os mais significativos, pois interfere muito na resistência à compressão. Analisando as prescrições estabelecidas pela <sup>(10)</sup> para argamassas autonivelantes, onde os valores mínimos para ensaio envolvendo compressão com substratos de concreto, devem ser superiores a 20MPa, observa-se que todas as argamassas autonivelantes estudadas estão em conformidade com a mesma.

### 3.3. Módulo de Elasticidade

A Figura 3 mostra a influência do teor de substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar sobre o módulo de elasticidade das argamassas, a partir da análise estatística (ANOVA).

Figura 3 – Influencia do teor de substituição no modulo de elasticidade





Compreende-se por meio do gráfico da Figura 3 e do teste Tukey, sendo que o maior valor se deu no teor de 0% o qual o módulo de elasticidade é de 13,35 GPa. Pode-se também afirmar que houve uma leve declividade nos teores de 3% e 10% quando comparados com a referência.

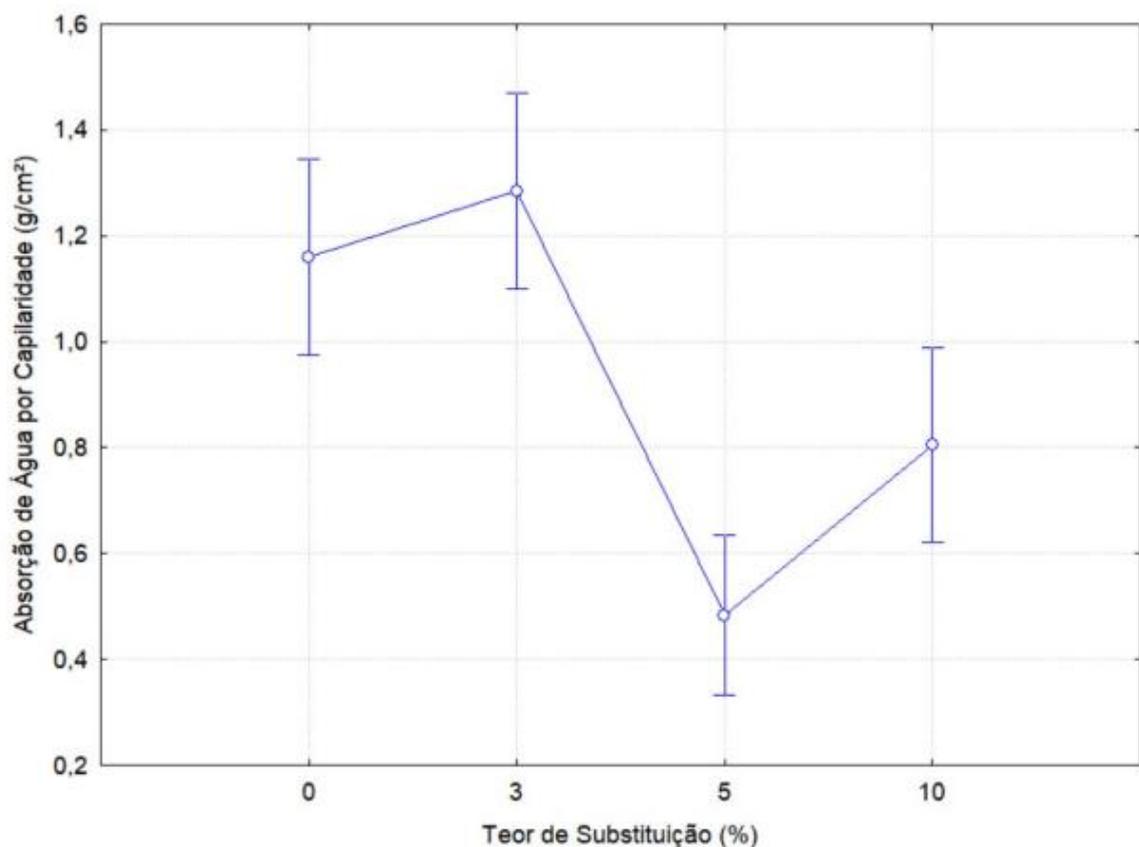
(11) fazem algumas observações e apontam que o módulo de deformação está diretamente ligado à sua porosidade. Segundo eles, é a rigidez que controla a capacidade de deformação da matriz cimentícia, e esta rigidez é determinada pela sua porosidade.

Devido a isso, pode-se justificar que os teores de 0%, 3% e 10% são os maiores valores de módulo da elasticidade, pelo fato de os mesmos serem menos porosos. Pode-se dizer que o teor de 0% pode ser considerado ideal para o módulo de elasticidade, pelo fato de o mesmo apresentar maior módulo de 13,35 GPa, o que de fato caracteriza como sendo um teor de material mais rígido, deformando menos quando comparado com o restante dos teores.

### 3.4. Absorção de Água por Capilaridade

A Figura 4 mostra a influência do teor de substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar sobre a absorção de água por capilaridade das argamassas, a partir da análise estatística (ANOVA).

Figura 4 – Influencia do teor de substituição sobre a absorção de água





Compreende-se por meio do gráfico da Figura 4, o coeficiente de capilaridade aumentou com o teor de substituição de 3%, diminuiu no teor de 5% em comparação com a referência e voltou a aumentar no teor de 10% quando comparado com o teor de 5% de substituição.

Com relação ao traço de referência (teor de substituição 0%), o teor de 3% apresentou aumento do coeficiente de capilaridade na ordem de 11,20%. Já o teor de substituição de 5% e 10% apresentaram queda no coeficiente de capilaridade na ordem de 58,62% e 31,03% respectivamente, sendo assim pode-se afirmar que o teor de 5% representa o melhor resultado.

Com o auxílio do Teste Tukey sabe-se que o teor de 3% com 1,29 g/cm<sup>2</sup>, é estatisticamente igual ao teor de referência com 1,16 g/cm<sup>2</sup>. Apesar disso, evidencia-se que o teor de 3% apresentou maior resultado de absorção de água, enquanto teor de 5% apresentou o menor resultado de absorção com 0,48 g/cm<sup>2</sup>. Pode-se afirmar que o teor de 5% obteve o melhor grau de compactação dos finos, o que comprova que existem menos espaços vazios no material.

Segundo <sup>(13)</sup>, uma argamassa de contrapiso com elevada porosidade proporciona maior leveza e um melhor isolamento térmico, em seus estudos a incorporação de material polimérico em argamassas fez com que a resistência mecânica diminuísse significativamente, entretanto, uma melhor proporcionalidade da incorporação podia resultar em boas características de argamassas para contrapiso.

## 4. CONCLUSÕES

Quando avaliado à propriedade mecânica da resistência à compressão, concluiu-se o teor que mais se aproximou da referência foi de 3% com resistência média de 47,97 MPa. Segundo as prescrições estabelecidas pela <sup>(10)</sup> para argamassas autonivelantes, pode-se afirmar que todos os teores obtiveram resultados satisfatórios perante a norma, pois a mesma informa para ensaio envolvendo compressão que os valores devem ser superiores a 20MPa.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, pode-se verificar que todos os valores se mantiveram abaixo do valor obtido para o traço de referência, decaindo conforme o aumento do teor de substituição, havendo um decréscimo de 9,59%, 36,33% e 11,24% para os teores de substituição de 3%, 5% e 10% respectivamente.

Em relação à propriedade de durabilidade, o menor resultado de absorção de água foi de 0,48 g/cm<sup>2</sup> para o teor de 5% de substituição de cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar na argamassa autonivelante. Isso significa chegar num teor de empacotamento dos finos ideal frente a absorção de água, quando comparado com o teor referência.



Conclui-se que a substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar é viável. Sendo o teor de 10% de substituição considerado bom, quando comparado os valores deste teor frente aos ensaios de resistência mecânica, os resultados foram satisfatórios, principalmente a resistência de compressão com valores acima do previsto pela norma. Portanto o maior teor de substituição é visto com bons olhos, pois além de ambientalmente vantajoso, dando um destino apropriado a cinza, visto que antes era descartada a maior parte em aterros sanitários, possibilita baratear o custo do metro cúbico da argamassa ao utilizar um material com preço de mercado abaixo do cimento Portland.

## 5. REFERÊNCIAS

1. AEC WEB: **Os verdadeiros impactos da construção civil**. Notícias, 2018. Disponível em: . Acesso em Maio de 2018.
2. MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIDER, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Revista Sustentabilidade em Debate**, v-3, n. 1, p. 75-96. 2012.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211. **Agregados para concreto** - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
4. TAMBARA JÚNIOR, L. U. D. **Desenvolvimento de argamassas com ativação alcalina de precursores residuais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016.
5. MARTINS, L. D. **Desenvolvimento de argamassa autoadensável de alta resistência**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Concreto. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
6. ARAÚJO, R. T.; ANJOS, dos S. A. M.; MARTINELLI, E. A.; FARIAS, de C. E.; SILVA, da F. R. C.; GOMES, L. L. V. **Efeitos da Incorporação do Filer Calcário e do Resíduo da Biomassa da Cana-de-Açúcar em Argamassas Autonivelantes**. XI SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, p.28-30. Porto Alegre-RS, 2015.
7. BALLISTA, L. P. Z. **Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados grãos reciclados modificados com látex estireno-butadieno**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2003.
8. TORRALBA, F. P.; JALALI, S. Resistência Mecânica e Durabilidade de Betões Modificados com Polímeros. **Revista Construção Magazine**, 6p. 2009.
9. PACHECO, J.; BILESKY, P; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2014. Natal-RN, 2014.
10. EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification & guidelines for polymermodified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use**. United Kingdom, 2002.
11. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2014.



12. BRAGA, M. B. C. **Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão: Efeito de fíler e pozolânico.** 2010. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
13. HESSEILER, R.F. **Caracterização térmica de contrapisos produzidos com poliuretano em substituição de areia.** Artigo apresentado em congresso. EURO ELECS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, 2017.



## INFLUÊNCIA DO USO DO JIGUE À ÁGUA NAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE RCD

**Luciana Vanni Frantz <sup>(1)</sup>; Iago Lopes dos Santos <sup>(2)</sup>;  
Angela Borges Masuero <sup>(3)</sup>**

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul - lucianavfrantz@gmail.com;

(2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul - iago.lopes.santos@gmail.com;

(3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul - angela.masuero@ufrgs.br

### RESUMO

Diversas pesquisas evidenciam a possibilidade de utilização de resíduos oriundos de construção e demolição (RCD) de obras de engenharia na forma de agregado graúdo reciclado. Contudo, a grande heterogeneidade deste material implica na significativa variabilidade de suas propriedades, bem como nas propriedades dos concretos com eles produzidos, o que dificulta a normatização para uso em grande escala. Assim sendo, diferentes formas de processamento e beneficiamento de agregados de RCD vêm sendo estudadas, com o intuito de reduzir essa variabilidade. Dentre os principais métodos, encontra-se a separação por densidade através do uso do jigue à água, equipamento bastante difundido na indústria da mineração e que é visto como potencial agente de beneficiamento de RCD no setor da construção civil. Este trabalho pretende caracterizar agregados graúdos reciclados de RCD coletados de uma usina de reciclagem em Porto Alegre visando a produção de concretos, bem como avaliar a eficiência do processo de jigagem para esses materiais. Deste modo, foram realizados os ensaios de massa específica, massa unitária, absorção de água e analisada a composição dos agregados presentes na camada superior e inferior do jigue, comparando-os com os agregados que não foram submetidos à jigagem. De maneira geral, o processo de jigagem se mostrou eficiente na melhoria das propriedades avaliadas dos agregados, com significativo potencial de aplicação em larga escala para processamento de RCD.

**Palavras-chave:** resíduo de construção e demolição, agregados graúdos reciclados, jigagem.

## INFLUENCE OF WATER JIG USE IN THE PROPERTIES OF CDW COARSE RECYCLED AGGREGATE

### ABSTRACT

Many researches emphasize the possibility of waste deriving of construction and demolition (CDW) from engineering works use as a coarse recycled aggregate. However, the big heterogeneity of this material involves its substantial properties variability as well as the properties of concretes produced with them, which hamper the standardization for large scale use. Therefore, different processing and CDW aggregates beneficiation forms has been studied in order to reduce this variability. Among the



main methods, there is the density separation with water jig use, a well diffused equipment in mining industry and which is seen as a potential CDW beneficiation agent in civil construction sector. This job intends to characterize CDW coarse recycled aggregate collected in a recycling plant in Porto Alegre aiming at concrete production, as well as assess the efficiency of jiggling process for these materials. Hence, the specific mass, the single mass and the water absorption tests besides the aggregate composition of the upper and the lower jig layers, comparing them with the aggregate that were not submitted to jiggling. In general, the jiggling process proved to be efficient in the improvement of assessed aggregates properties, with significative potential to be applied in large scale to CDW processing.

**Keywords:** construction and demolition waste, coarse recycled aggregate, jiggling process.

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2015, foram gerados 79,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, de acordo com dados da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS <sup>(1)</sup>, sendo que 70% desses resíduos foram gerados de processos construtivos ou de demolição, segundo o SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL <sup>(2)</sup>. Quase a totalidade desse alarmante volume é depositada em aterros sanitários comuns dos municípios ou até descartada irregularmente na natureza, causando prejuízo ambiental.

Os impactos da construção civil são uma problemática ampla e generalizada em todo o mundo e a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma das melhores alternativas para amenizá-los, visto que se diminui o volume de resíduos sólidos depositados nos aterros e a extração de matérias primas não renováveis. Além disso, o ato de reciclar propicia uma diminuição de descartes clandestinos, um crescimento de vida útil dos aterros e, conseqüentemente, uma redução de custos de gerenciamentos de resíduos <sup>(3)</sup>. Porém, em 2015, de acordo com o relatório da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO <sup>(4)</sup>, apenas 6,14% dos RCD tiveram algum tipo de reaproveitamento no nosso país, sendo desperdiçada a maior parte desses materiais que comprovadamente podem ser reutilizados.

A grande barreira para a normatização e aproveitamento desses materiais a larga escala se deve a imensa heterogeneidade de seus componentes, o que, por consequência, ocasiona a significativa variabilidade de suas propriedades, bem como nas propriedades dos concretos com eles produzidos. Para isso, diferentes formas de processamento e beneficiamento têm sido aplicadas com o intuito de se ter um maior conhecimento de suas propriedades para uma aplicação mais segura e eficaz em processos construtivos.

Diferentes métodos para selecionar rapidamente um percentual significativo dos materiais mais nobres, que possuem melhor qualidade e podem ser usados em substituição ao agregado gráudo natural em concretos estruturais, têm sido testados para o estudo de uso em larga escala. Um desses métodos é a jigagem com o uso do jigue à água, bastante difundido na mineração, mas que atualmente também é considerado como um potencial mecanismo de beneficiamento dos agregados reciclados. O equipamento separa por diferença de densidade os componentes do resíduo,



depositando o material com maior densidade na parte inferior, sendo este considerado de melhor qualidade.

Para a finalidade desta pesquisa, foram separadas diferentes gavetas de RCD jigado a fim de comparar, através alguns ensaios de determinação de características físicas, os materiais estratificados com outros que não passaram pelo processo de jigagem, avaliando, assim, a eficácia deste processo para beneficiamento de agregados reciclados e determinando suas garantias de desempenho na construção civil.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Nesta pesquisa foi utilizado um agregado reciclado de construção e demolição proveniente de um aterro localizado no município de Porto Alegre. Estes foram peneirados e utilizados aqueles presentes na faixa granulométrica entre 4,8 e 19 mm, devido estar dentro faixa operacional do jigue hidráulico. Para sua caracterização tomou-se por base a massa específica de  $2,49 \text{ g/cm}^3$  seguindo o método proposto por Leite <sup>(3)</sup>, a massa unitária de  $1,14 \text{ g/cm}^3$ , conforme normativa NBR NM 45 <sup>(5)</sup>, massa, o módulo de finura deste agregado é de 6,62 de acordo com a NBR NM 248 <sup>(6)</sup> e absorção de água de 10,11% proposto por Leite <sup>(7)</sup>.

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Separação por densidade através de jigue à água

Este trabalho visa estudar a influência da jigagem nas principais propriedades dos agregados graúdos reciclados de RCD. Assim, a separação gravimétrica dos agregados ocorreu através de um jigue hidráulico, modelo AllJig S-400 (figura 1-A). Este equipamento possui duas seções distintas, sendo uma para disposição das bandejas de separação (figura 1-B) e a outra responsável pela pulsação de ar, o qual movimenta as bandejas da primeira seção. Enquanto um fluxo contínuo mantém o leito em um estado pré-expandido, um fluxo pulsátil promove sucessivos golpes de dilatação e compactação do leito, segregando partículas de diferentes densidades devido à relativa movimentação vertical dos grãos em resposta à ação combinada da força de arrasto (movimento ascendente) e da força de gravidade (movimento descendente). Os parâmetros de controle de jigagem foram definidos em: tempo de jigagem de 2 min e frequência de pulso de 80 RPM (rotações por minuto). O jigue utilizado na pesquisa tem capacidade de 25 kg por lote de material de faixa granulométrica de 1 a 19 mm. O volume de material utilizado por jigagem permitiu o preenchimento de três gavetas de 5 cm e duas gavetas de 2,5 cm de altura, conforme observado na figura 1-C.

Para esta pesquisa foi avaliada a real influência do processo de jigagem no que tange às propriedades dos agregados jigados da camada inferior e superior, comparando-as com os agregados de referência que não foram submetidos a separação por densidade. Desta forma, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização do agregado de RCD: composição do RCD, massa específica, massa unitária, absorção de água.



Figura 1 – (A) jigue hidráulico, (B) gavetas e (C) camadas analisadas no estudo.



### 2.2.2. Determinação da composição do RCD

Como se trata de um ensaio não normatizado, o procedimento adotado foi uma análise visual dos agregados reciclados, que foram separados em três amostras de aproximadamente 1,5 kg e entregues para três pessoas diferentes realizarem a classificação. Esse método torna a avaliação dos grãos subjetiva a cada pessoa, sendo, portanto, feita uma média de todos os resultados ao final do processo, assim obtendo a composição de cada camada do jigue.

### 2.2.3. Determinação da massa específica

O ensaio de determinação da Massa Específica dos agregados de RCD das camadas inferior e superior do jigue e dos materiais não jigados foi feito de acordo com o proposto por Leite <sup>(3)</sup>, cuja aparelhagem indicada é uma balança com resolução de 0,01g, uma bomba de vácuo (com registros, vacuômetro e conexões que deve ser capaz de aplicar um vácuo de 88 kPa), um picnômetro e uma placa de vidro.

A preparação para o ensaio consiste em submeter os agregados de cada amostra a um processo que dura 3 dias. Primeiramente, seca-se a amostra em estufa a temperatura entre 105 e 110°C por 24 horas para, depois de resfriada, pesar-se a sua massa, que deve ser em torno de 1000g (C).

Com isso, se coloca a amostra no picnômetro com água à temperatura ambiente, sem preenchê-lo completamente, e por fim, se deixa o recipiente tampado com a placa de vidro em repouso por mais 24 horas conforme figura 2.

Figura 2 - Picnômetro com água e amostra tampado com a placa de vidro.





Posteriormente, se aplica vácuo no conjunto durante 15 minutos com o uso da bomba de vácuo, agitando cuidadosamente para retirar o ar aprisionado entre os grãos do agregado. Acrescenta-se água à temperatura ambiente no recipiente até preenchê-lo completamente e tampando-o com a placa de vidro sem que haja nenhuma bolha de ar aprisionada. Para determinar a massa do conjunto recipiente+água+placa de vidro+amostra (A), primeiramente se tem o cuidado de secar externamente o recipiente. Feita a pesagem, se retira a amostra, se lava o recipiente e se preenche-o completamente com água, colocando sobre ele a placa de vidro também de forma a não haver bolhas de ar aprisionadas e também tendo o cuidado de secar externamente o recipiente, para então pesar o conjunto recipiente+água+placa de vidro (B).

A massa específica será calculada pela equação (A):

$$\gamma = \frac{C}{B-A+C} \quad (A)$$

Onde:

$\gamma$  = Massa específica do agregado graúdo, expressa em kg/dm<sup>3</sup> ou g/cm<sup>3</sup>;

A = Massa da amostra+recipiente+água+placa de vidro, expressa em g;

B = Massa do recipiente+água+placa de vidro, expressa em g;

C = Massa da amostra seca em estufa, expressa em g.

#### 2.2.4. Determinação da massa unitária

As massas unitárias das amostras de RCD foram determinadas de acordo com o método A da NBR NM 45 <sup>(5)</sup>, que indica secar a amostra em estufa por 24 horas entre temperaturas de 105 e 110°C para então se preencher um recipiente com massa e volume conhecidos em 3 camadas, aplicando 25 golpes com uma haste em cada camada e, logo após, nivelando a borda com régua metálica para garantir o total preenchimento do agregado. Com isso, se determina a massa da amostra e se calcula a massa unitária conforme a equação (B):

$$\rho = m/V \quad (B)$$

Onde:

$\rho$  = Massa unitária do agregado, em kg/m<sup>3</sup>

$m$  = Massa da amostra, em kg;

$V$  = Volume do recipiente, em m<sup>3</sup>.

#### 2.2.5. Determinação da absorção de água

O ensaio para se obter a curva de absorção de água para os agregados de RCD segue o proposto por Leite <sup>(7)</sup>, cuja aparelhagem indicada é uma balança com resolução de 0,01g, um dispositivo para manter suspenso o recipiente com a amostra na água, fixado no centro da balança e um recipiente metálico com uma tela de fios metálicos, que contorne toda a sua extensão, e que contenha suportes laterais para que possa ser suspenso por haste do dispositivo fixado no centro da balança, como mostra a figura 3.



Figura 3 - Aparelhagem para o ensaio de absorção de água.



Antes do teste é preciso secar a amostra por 24 horas em estufa à temperatura entre 105 e 110°C e deixá-la resfriar ao ar à temperatura ambiente, para então pesar uma quantidade de material seca e fria numa faixa em torno de 1000 e 1500 g, para não ultrapassar a capacidade máxima da balança, que é de 2 kg.

Primeiramente se tara a balança com o recipiente metálico e manta submersos e para realizar o ensaio se coloca a amostra seca nesse recipiente se submerge o conjunto cuidadosamente em água à temperatura ambiente, começando então a marcar o tempo. Executa-se a primeira leitura da massa do conjunto 60 segundos após a imersão, tempo considerado necessário para que haja uma certa estabilização da leitura da massa. As leituras consecutivas do ganho de massa são feitas em intervalos pré-determinados durante 24 horas e, antes da realização de cada leitura, o material deve ser cuidadosamente agitado para facilitar a saída do ar aprisionado entre as partículas de agregados.

Para calcular a taxa de absorção se constrói o gráfico de absorção de água percentual em função do tempo em minutos, aplicando-se a expressão (C):

$$An(\%) = \frac{A(g)_n}{A(g)_{24h}} \times 100 \quad (C)$$

Onde:

$An(\%)$  = Absorção de água percentual no instante n;

$A(g)_n$  = Massa de água absorvida até o instante n, em g;

$A(g)_{24h}$  = Massa de água absorvida em 24 horas de ensaio, em g.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Determinação da Composição dos Agregados

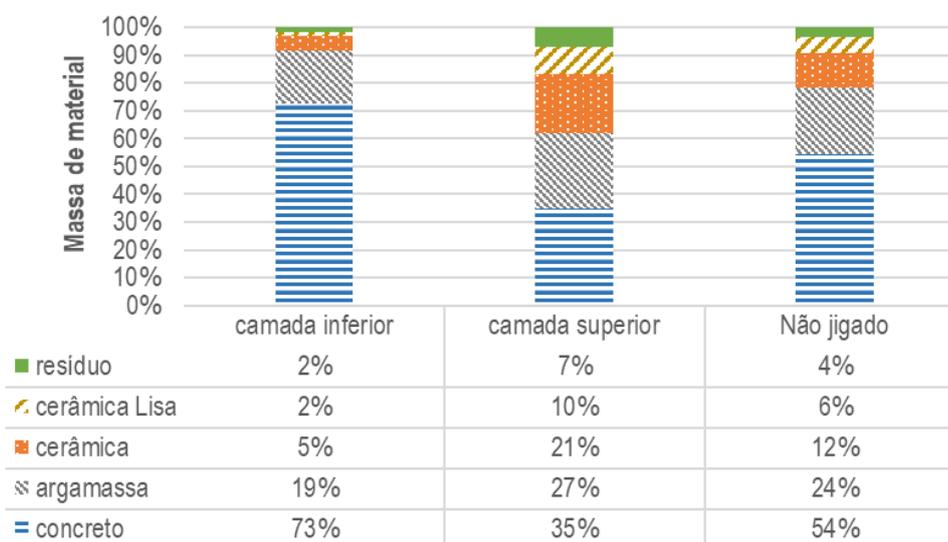
O RCD é todo resíduo gerado de reforma, escavação ou demolição e, normalmente, compreendem materiais inertes (concretos, cerâmicas, tijolos, telhas, entre outros), com quantidades menores de outros componentes, como a madeira, vidro, gesso, misturas betuminosas, entre outros<sup>(8)</sup>. O principal entrave para utilização do agregado reciclado de RCD em concreto é a grande heterogeneidade da sua composição, uma vez que o setor da construção engloba diversos tipos de sistemas construtivos,



a variabilidade dos materiais está intrínseca no seu meio e sua separação total seria praticamente impossível <sup>(3)</sup>.

Assim, foi realizado o ensaio de composição para identificar os principais constituintes do agregado coletado para o estudo. Percebe-se em sua composição: concretos, argamassas, agregados cerâmicos e alguns resíduos. Foram obtidas porcentagens de massa para cada material presente na amostra em relação à massa total ensaiada para determinação da composição específica do RCD. A figura 4 apresenta as porcentagens da composição dos agregados de RCD antes e após serem submetidos a separação por densidade através do jigge à água.

**Figura 4 - Composição dos RCD nas camadas inferior e superior do jigge e antes da jigagem.**



Observa-se que houve a separação dos componentes do RCD quando foram sujeitos ao processo de jigagem hidráulica, com maior fração de agregados mais densos na camada inferior do jigge e os menos densos na camada superior. Inicialmente, o percentual de concreto era de 54% e após serem submetidos a jigagem este passou a 73% na camada inferior, por ser o material mais denso na amostra. A quantidade de material cerâmico antes da jigagem era de 18% e após a concentração gravítica se estabeleceu em apenas 7%. Já a argamassa, por sua densidade ser considerada intermediária, dentre os demais constituintes, o processo de jigagem se mostrou menos eficiente, porém não menos importante, reduzindo de 24 % para 19%. Desta forma percebe-se a eficiência do processo de jigagem na separação dos componentes do RCD mostrando-se como uma alternativa de obter agregados mais nobre para produção de concretos.

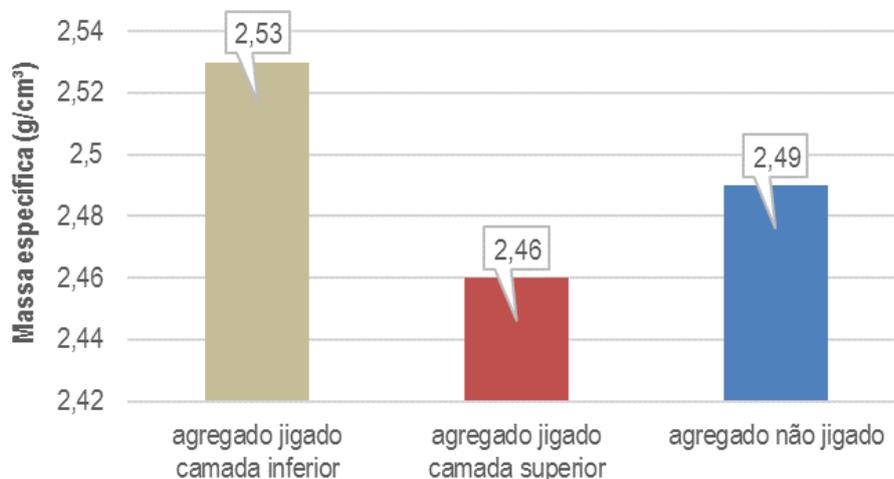
### **3.2. Determinação da Massa Específica**

A massa específica é uma propriedade de suma importância devido a sua significativa influência nas propriedades do concreto. Para realização de uma dosagem de concreto, a determinação da massa específica dos materiais constituintes é importante para calcular o consumo dos materiais da mistura. A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros internos.



Para este estudo foi adotada a metodologia proposta por Leite <sup>(3)</sup> por ser a habitualmente utilizada para agregados graúdos de RCD. Os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados de RCD antes e após a jigagem estão descritos na figura 5.

Figura 5 - Massa específica dos agregados de RCD não jigados e da camada inferior e superior após serem submetidos a jigagem.



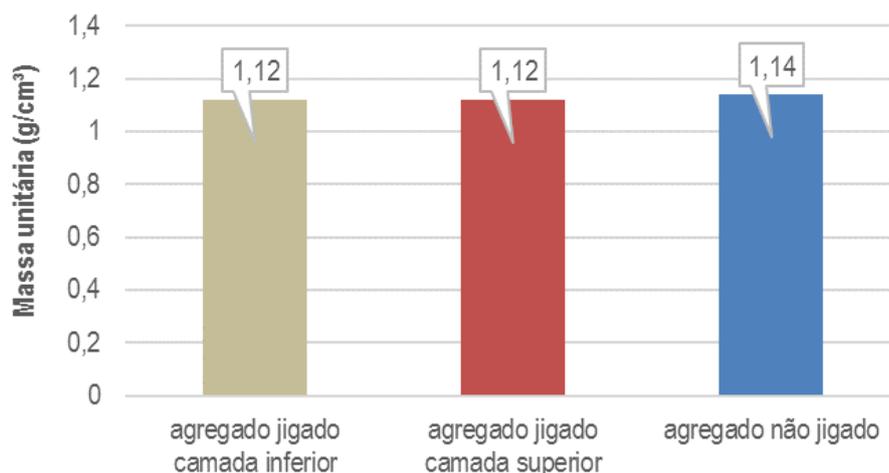
Percebe-se que a massa específica dos agregados graúdos de RCD foi de 2,53 g/cm<sup>3</sup> na camada inferior do jig, 2,46 g/cm<sup>3</sup> na camada superior e 2,49 g/cm<sup>3</sup> para aqueles agregados que não passaram pelo processo de jigagem. Como foi mostrado nos resultados de composição do RCD, a maior presença de concreto e menor quantidade de materiais cerâmicos na camada inferior pode ser um fator positivo no aumento da massa específica dos agregados. A camada superior por possuir agregados com caráter misto resultou em agregados com uma massa específica menor em relação aos agregados que não foram jigados. Assim, permite-se inferir que o procedimento de jigagem tem influência na massa específica do agregado de RCD.

### 3.3. Determinação da Massa Unitária

A massa unitária mede a massa referente ao agregado sobre o volume do mesmo considerando os vazios entre os grãos, uma vez que não é possível empacotar completamente as partículas dos agregados de modo que não existam vazios entre elas <sup>(9)</sup>. A NBR NM 52 <sup>(10)</sup> considera o volume de vazios sendo espaço entre os grãos de uma massa de agregado. Quanto maior for o volume de vazios, menor é a resistência mecânica e maior é a absorção de água e consumo de cimento <sup>(11)</sup>. Por sua vez, sua determinação é importante para conversões entre valores de massa e volume <sup>(12)</sup>. A figura 6 apresenta os resultados do ensaio de massa unitária para os agregados de RCD antes e após serem submetidos à jigagem à água. Diferente do encontrado para a massa específica, o processo de jigagem não proporcionou tanta influência na massa unitária, apresentando um ligeira decréscimo do valor da massa unitária para os agregados jigados, porém não se pode afirmar que sofre influência do processo de beneficiamento gravimétrico.



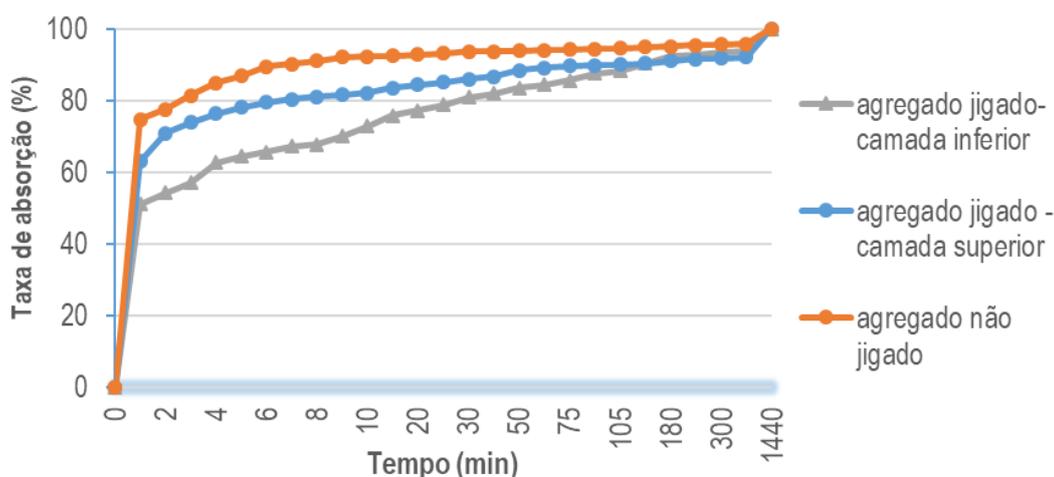
Figura 6 - Massa unitária dos agregados de RCD antes e após a jigagem.



### 3.4. Ensaio de Absorção de Água

Os agregados reciclados possuem uma maior porosidade quando comparados aos agregados naturais, o que resulta numa maior capacidade de absorção de água, podendo afetar algumas propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido <sup>(13)</sup>. Assim sendo, a determinação da taxa de absorção de água dos agregados de RCD se faz necessária de modo a evitar futuros problemas aos concretos. As figuras 7 e 8 apresentam os resultados dos ensaios de absorção de água para os agregados de RCD que foram submetidos ao processo de jigagem e os compara com aqueles que não passaram pelo beneficiamento gravimétrico.

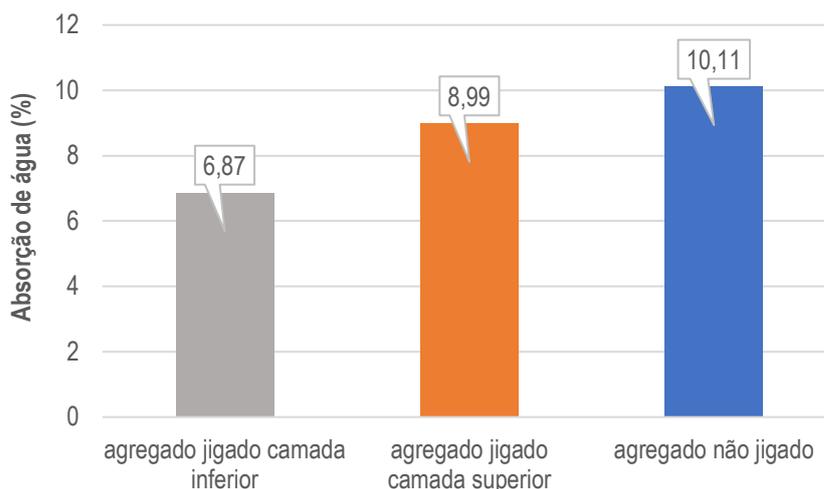
Figura 7 - Taxa de absorção de água ao longo do tempo dos agregados de RCD.



Com base na figura 7, percebe-se que os agregados reciclados de RCD absorvem grande quantidade de água já no primeiro minuto, com valores acima de 54% para o agregado jigado na camada inferior, 63% para o agregado para o da camada superior e 74% para o agregado não jigado, conferido pela elevada porosidade de sua estrutura.



Figura 8 - Taxa de absorção de água dos agregados.



Com os resultados obtidos, verificou-se que o processo de jigagem proporcionou uma melhora nas propriedades dos agregados de RCD quanto à absorção de água. Para tal, observou-se uma redução de 32,04% na absorção de água do agregado da camada inferior e 11,07% para o agregado da camada superior quando comparados ao agregado de RCD não jigado. Os agregados da camada inferior são basicamente constituídos de concretos, com maior massa específica, sendo este menos porosos que os agregados de origem cerâmica, podendo ser fator determinante nesse resultado. Mondini <sup>(14)</sup> não observou influência significativa do processo de jigagem nas características de absorção dos agregados de RCD, fato atribuído a semelhança nas massas específicas dos agregados utilizados.

#### 4. CONCLUSÕES

De modo geral, pode-se concluir com este trabalho que o processo de jigagem se mostrou eficiente para o beneficiamento dos agregados graúdos reciclados de RCD, visto que contribuiu com a redução da variabilidade em alguns aspectos, como por exemplo na composição das amostras, que se mostraram com materiais mais nobres na gaveta inferior do jigue, sendo esta a que seria utilizada para a produção de concretos. Logicamente, com a maior presença de resíduos de concretos na camada inferior, se obteve melhoria nos valores de massa específica e nas taxas de absorção de água, visto que concretos possuem maior massa específica e são menos porosos que os agregados de origem cerâmica.

Sendo assim, o jigue hidráulico mostra-se como um potencial agente de processamento de RCD para aplicação em larga escala por ser um processo rápido e com resultados satisfatórios. De qualquer forma, a continuidade dos estudos referentes à possibilidade de reciclagem desses materiais é de imensa importância para a sociedade.



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2015.
- (2) SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil - avanços institucionais e melhorias técnicas**. 2015.
- (3) LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. p. 290
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Usinas Mapeadas no Brasil**. Disponível em: <<http://www.abrecon.org.br/quem-somos/>>. Acesso em 10 de maio de 2019.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. **NBR NM 45**, Rio de Janeiro, 2006.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica. **NBR NM 248**, Rio de Janeiro, 2003.
- (7) LEITE, M. B. et al. Proposta de Adaptação do Procedimento Proposto Por Leite (2001) Para Determinação da Absorção de Agregados Reciclados de Resíduo de Construção Demolição. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 7. Fortaleza, 2011. **Anais...** Fortaleza, 2011.
- (8) JRC Report EUR 24918 EN 2011. **Supporting Environmentally Sound Decisions for Construction and Demolition (C&D) Waste Management – A practical guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA)**. European Commission Joint Research Centre, 2011.
- (9) MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. PINI. ISBN.: 85-7266-040-2, p. 573, 1994.
- (10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. **NBR NM 52**, Rio de Janeiro, 2009.
- (11) Gómez-Soberón, J. M. V. (2002) "**Porosity of concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study**", Cement and Concrete Research, v. 32, n. 8, p. 1301-1311.
- (12) NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.; **Tecnologia do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, p. 41-277, 2013.
- (13) CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.
- (14) MONDINI, B. G. **Avaliação da variabilidade de concretos utilizando resíduos de construção e demolição submetidos ao processo de separação por jigagem a seco**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.



## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À FLEXÃO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO-POLIMÉRICO À BASE DE CIMENTO PORTLAND E GRÃOS RECICLADOS AGLUTINADOS DE POLIPROPILENO

Coelho, Rivaldo Teodoro <sup>(1)</sup>; Ducatti, Vitor Antonio <sup>(2)</sup>; Salado, Gerusa de Cássia <sup>(3)</sup>

(1) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/FT/Limeira, São Paulo/SP, Brasil - e-mail: r004594@dac.unicamp.br;

(2) Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas – FEC/UNICAMP (aposentado) - e-mail: antonioducatti@uol.com.br ; (3) Professora Doutora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/FT/Limeira, São Paulo, Brasil - e-mail: gerusa@ft.unicamp.br

### RESUMO

A produção mundial de resinas termoplásticas em 2016 foi de 407 milhões de toneladas por ano, das quais 6,4 produzidas no Brasil. Desde 1950 até 2015, 8.300 milhões de toneladas foram produzidas no planeta e 6300 milhões foram descartadas sem reciclagem. O Brasil recicla em média 25% deste material. Este estudo tem como objetivo analisar a resistência à compressão axial e à flexão de um compósito cimentício-polimérico a base de cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI-V) tendo como agregados a areia e os grãos reciclados aglutinados de polipropileno (GRAPP) como substituto dos agregados graúdos. Foram utilizadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT para se determinar as resistências à compressão axial e resistência à tração na flexão. Os grãos aglutinados de polipropileno deste estudo foram coletados do descarte na linha de produção industrial de artefatos plásticos e são resultantes de um processo de aglutinação de polipropileno limpo e descontaminado, sem passagem por qualquer sistema de coleta pública ou programa de coleta seletiva. Os resultados dos ensaios laboratoriais demonstraram ser possível obter um compósito cimentício-polimérico com resistências suficientemente elevadas para a aplicação na construção civil com benefícios diretos ao meio ambiente e à produção habitacional.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos, compósitos, plásticos, reciclagem, polipropileno, GRAPP, pré-fabricado, meio ambiente, engenharia de materiais.

## RESISTANCE TO AXIAL COMPRESSION AND FLEXION OF CEMENTITIOUS-POLYMERIC COMPOSITE BASED ON PORTLAND CEMENT AND RECYCLED POLYPROPYLENE AGLUTINATED GRAINS

### ABSTRACT

The world production of thermoplastic resins in 2016 was 407 million tons per year, of which 6.4 were produced in Brazil. From 1950 to 2015, 8,300 million tons were produced on the planet and 6300 million tons were disposed of without recycling. Brazil recycles on average 25% of this material. This research proposes the use of recycled polypropylene agglutinated as a substitute of the large aggregates in the concrete and, to this end, studies its behavior characterizing it by means of a composite based on Portland cement of high initial resistance, CP-V-ARI. The agglutinated polypropylene grains of this study were collected from the disposal in the industrial production line of plastic artifacts and are the result of adjustments and losses during the manufacturing stages, being thus waste without passing through any public collection system or selective collection program. The initial results concerning the axial, diametral and modulus tensile strengths of different strengths confirm the applicability of this composite in the production of prefabricated parts or components for civil construction.

**Keywords:** solid waste, composite, plastic, recycling, polypropylene grains, GRAPP, prefabricated.



## 1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Plástica - ABIPLAST (2018)<sup>(1)</sup>, desde 1950 até 2015, a produção mundial de plásticos cresceu de 2 milhões de toneladas para 407 milhões de toneladas anuais. Como resultado, estima-se que já foram produzidos cerca de 8300 milhões de toneladas das quais 6300 já foram descartadas. Desde descarte, apenas 9% foram reciclados, ou seja, aproximadamente 567 milhões de toneladas. O restante, 12% foram incinerados e 79% dispostos em aterros sanitários ou no meio ambiente.

São toneladas de embalagens e de produtos manufaturados em plásticos de diversos tipos que se juntam a outros materiais com potencial de reciclagem como papel, vidro, papelão e alumínio além dos materiais originados nas etapas de produção e demolição de obras da construção civil. Um conjunto diversificado de materiais cuja decomposição pode ocorrer em até 100 anos.

Todos com alto potencial poluidor, quando depositados nos aterros sanitários, lixões a céu aberto ou simplesmente despejados nos cursos de água doce e oceanos e natureza em geral. Simultaneamente também todos com alto potencial de reciclagem uma vez que são matérias-primas que podem ser recicladas e transformadas em novos produtos agregando-lhes novos valores e aplicações além de prolongar seus ciclos de vida.

No Brasil, ainda segundo dados ABIPLAST(2018) <sup>(1)</sup>, a produção física de transformados plásticos em 2015 foi de 5,8 milhões de toneladas cuja principal resina consumida foi o PP-Polipropileno com 21,9%, seguido do PEAD-Polietileno de Alta Densidade com 17,5% e em terceiro lugar o PVC-Policloreto de Vinila com 15,7% e o PET-Polietileno Tereftalato, atingiu 7,2%..

Os plásticos do tipo termoplásticos, são utilizados em quase todos os setores da economia e da vida moderna: construção civil, agricultura, fabricação de calçados, móveis, alimentos, têxtil, lazer, telecomunicações, eletroeletrônicos, automobilísticos, médico-hospitalar, energético, ou seja, em todos os aspectos da vida moderna rural e urbana, competindo e substituindo quase todos os demais materiais, inclusive madeiras, tecidos e cerâmicas, vidros e metais.

Na construção civil, é um dos materiais essenciais para a fabricação de tubos, conexões, esquadrias, forro e revestimento de teto, paredes e piso, assim como em peças, acessórios, ferramentas, utilidades e mobiliário. No campo da tecnologia de concretos e argamassas, sua utilização é comum na produção de concretos usinados especiais por meio das adições de polipropileno em fibras indicadas para reforços e minimização de patologias ou incorporado na forma de pérolas de poliestireno expandido (EPS) indicado para a produção de concretos leves, sendo ainda, praticamente inexistente, a produção e aplicação de grãos aglutinados de polipropileno (GRAPP).

Daí o interesse em estudá-lo como componente de concretos compósitos de matriz cimentícia podendo ser combinados com compósitos de outras matrizes, sejam elas poliméricas, vegetais, minerais, matrizes metálicas ou ainda blendas e compósitos mistos.

Dentre os materiais constantemente pesquisados no Brasil e no exterior, pode-se listar as fibras de vidro, fibras de madeiras, fibras de polipropileno, flocos de polipropileno, flocos de PET, polipropileno moído, PET moído, cinza da casca do arroz, nano compósitos de polietileno-grafite, borracha moída, EPS, PVC, escória de alto forno, resíduos de construção e demolição (RSCD), aparas de couro, dentre outros. Com relação ao polipropileno na forma de grãos reciclados aglutinados existem poucas pesquisas nacionais e internacionais.



Akinyele, Salim e Oyeti, (2015)<sup>4</sup>, realizaram e publicaram experiência com o polipropileno na forma de grão reciclado, na África do Sul. Utilizando os grãos na forma de pellets, a pesquisa consistiu no ensaio de comportamento de vigas prismáticas compostas por compósito cimentício à base de cimento Portland e grãos de polipropileno nas quais constataram perdas de desempenho em todas as propriedades mecânicas ensaiadas e ao final recomendaram o uso do compósito para concretos leves não estruturais. Os resultados encontrados estão diretamente ligados à pouca aderência entre o agregado polimérico e argamassa devido à característica dos grãos utilizados, no caso, lisos.

Neste trabalho serão utilizados grãos reciclados aglutinados de polipropileno - GRAPP obtidos a partir do descarte industrial de peças imperfeitas, rebarbas, cortes, recortes, sobras ou perdas e ocorridas durante o processo de fabricação na linha de produção.

Empresas recicladoras transformam os resíduos plásticos inicialmente classificando-os e depois, já separados, são cortados, triturados e lavados para a remoção de impurezas e descontaminação. Em seguida, são secos e encaminhados para a etapa de aglutinação, onde se formam os grãos e depois seguem para o processo de extrusão onde se formam os “fios ou cordões” os quais são resfriados e cortados na forma de pequenos bastões cilíndricos também denominados pellets (grãos lisos fragmentados).

Este trabalho pretende contribuir no desenvolvimento de novos materiais compósitos aplicáveis na construção civil, buscando o aproveitamento de materiais recicláveis agregando-lhes parte de seu valor econômico, prolongando seus ciclos de vida e gerando benefícios diretos na gestão dos problemas e impactos ambientais e simultaneamente oferecendo alternativas de solução para as questões habitacionais.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para atingir o objetivo deste trabalho, foram ensaiados corpos de prova cúbicos e cilíndricos cujos dados foram analisados para determinar algumas propriedades mecânicas no estado endurecido do compósito resultante, dentre as quais destacou-se a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão.

### **2.1 Materiais componentes do concreto**

#### **2.1.1 Cimento**

O cimento utilizado no desenvolvimento desta pesquisa foi o CP-V-ARI - Resistência Inicial - ABNT NBR 5733:1991<sup>(3)</sup>, com a finalidade de prover resistências próximas daquelas atingidas aos 28 dias logo nas primeiras idades.

#### **2.1.2 Agregado miúdo**

A areia utilizada foi previamente passada na peneira #8, abertura da malha 2,4 mm e depois ensaiada para determinação de sua massa específica aparente, massa unitária e curva granulométrica e a massa específica aparente da areia foi determinada pelo ensaio do frasco de Chapman pelo método NBR 7217:1987<sup>(9)</sup>.



### 2.1.3 Água

Utilizou-se, em todo o processo, água potável em temperatura ambiente disponível no Laboratório da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas – FEC/UNICAMP, local onde todos os ensaios foram desenvolvidos.

### 2.1.4 Aditivo químico superplastificante

Utilizou-se o aditivo superplastificante com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado (policarboxilatos), isento de cloretos, compatível com as prescrições da norma ASTM/C-494 (tipos A e F), ASTM/ C-1017 e com todos os cimentos que atendem a ASTM -150 e NBR 7688:1992.

### 2.1.5 Grãos reciclados aglutinados de polipropileno (GRAPP)

Todo o plástico utilizado como substituição no concreto foi obtido através da aglutinação de flocos e tiras de plásticos previamente lavados e triturados antes do processo de aglutinação. Cabe ressaltar que estes grãos são resultantes de um desenvolvimento ocorrido entre 2001 e 2005, tempo decorrido entre o desenvolvimento de um fornecedor e de grãos mais compatíveis em formato e a granulometria adequados para a produção dos compósitos e início da realização dos ensaios laboratoriais.

Os grãos foram adquiridos sob declaração formal de isenção de vestígios de borracha, metais, minérios, minerais ou materiais orgânicos provenientes de vegetais ou animais, graxas, óleos, combustíveis, inseticidas, agrotóxicos e sem adições ou aditivos especiais como corantes, estabilizantes, compostos químicos e sem a adição de plástico virgem ou de blendas plásticas.

A curva granulométrica dos grãos foi obtida por meio do ensaio determinado pela norma brasileira NBR 7211:83 <sup>(6)</sup>. Neste ensaio, também foi determinada a dimensão máxima característica dos grãos de polipropileno aglutinado reciclado e seu módulo de finura utilizando-se a mesma norma.

## 2.2 Dosagem experimental

Todos os ensaios constantes neste estudo foram realizados seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT para a construção civil.

Primeiramente, com o objetivo de caracterizar a areia e o grão de polipropileno, foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica aparente e unitária.

Posteriormente, iniciou-se a dosagem experimental para se determinar o limite de substituição do agregado graúdo (brita) pelo GRAPP considerando a formação de pasta suficiente para se trabalhar com as misturas, a resistência à compressão axial na idade de 7 dias, o aspecto dos compósitos resultantes, a necessidade (ou não) de ajuste do traço e seleção das misturas para dar sequência aos ensaios em corpos-de-prova cilíndricos.

Foram desenvolvidas duas séries de misturas além de um traço de referência. A primeira série foi identificada pela letra “P” e numerada sequencialmente de 1 a 10 (P1 a P10), correspondente às misturas com substituição parcial da areia pelo GRAPP em intervalos de 5% da massa total dos agregados. Desta série, não foram executadas as misturas P8 e P9.



**Figura 1: grãos reciclados aglutinados de polipropileno – GRAPP**



## **2.3 Confeção dos corpos-de-prova**

### **2.3.1 Corpos-de-prova cúbicos**

Nesta etapa, e para esta série, foram moldados corpos-de-prova cúbicos com arestas na dimensão de 75 mm, partindo-se do traço inicial em massa 1:2 com relação água/cimento (a/c) 0,30 e aditivo superplastificante líquido na proporção de 1% em relação à massa do cimento.

A segunda série foi identificada como P21 e P22, correspondentes às misturas com substituição total da areia pelo GRAPP sendo seus traços respectivamente 1:0,3 e 1:0,4 mantendo-se as mesmas proporções para a relação água/cimento e superplastificante adotados na série A. O traço de referência foi identificado como P0.

Na sequência, foram selecionados os traços e as misturas para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, resistência à tração na flexão e determinação do módulo de elasticidade secante, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos na dimensão de 10,0 cm de diâmetro e 20,0 cm de altura.

Para iniciar os ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, decidiu-se por um traço em massa 1: 2: 0,30 com o aditivo superplastificante a 1% da massa de cimento. Este traço, rico em cimento, foi escolhido com base em duas hipóteses;

A primeira considerando que um traço mais rico poderia compensar a eventual perda destas citadas resistências em função da retirada dos agregados miúdos (parcial e gradativamente) e graúdo (totalmente) e suas respectivas substituições pelos grãos de polipropileno.

A segunda hipótese, considerando a possibilidade de se obter altas resistências à compressão axial e à tração na flexão para evitar que os grãos de plástico se destacassem do concreto em obras prontas na construção civil, ou elementos pré-fabricados, contaminando novamente o meio ambiente com resíduos plásticos. Todas as substituições foram executadas em relação à massa total dos agregados.



Figura 2: Moldagem dos corpos-de-prova cúbicos



### 2.3.2 Procedimento de cura

Todos os corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos foram desmoldados com 1 dia de idade e imediatamente encaminhados para uma câmara úmida, iniciando-se sua imersão total em água em temperatura ambiente por 3 dias, seguida de cura ambiente até a estabilização da massa.

### 2.3.3 Corpos-de-prova cilíndricos

Após os ensaios realizados com os corpos-de-prova cúbicos, foram selecionadas três (03) misturas para os ensaios definitivos. Desta forma, foram moldados duas (02) misturas da Série A (com areia), a saber, P6 e P10 e uma da Série B (sem areia), P22.

Em ambos os casos, foram mantidos os traços iniciais, sem ajustes.

Destas séries foram ensaiados com corpos-de-prova cilíndricos para determinar a resistência à compressão axial e à tração na flexão por meio de vigas prismáticas para ensaio de resistência à tração na flexão. Todos estes ensaios foram realizados com as idades de 7 e 28 dias.

A moldagem foi feita usando fôrmas metálicas cilíndricas, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm (figuras 3 e 4), sendo moldados 4 corpos-de-prova de cada mistura para cada ensaio, acima descrito e respectiva quantidade de vigas prismáticas.

Figura 3: moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos



Figura 4: Corpos-de-prova cilíndricos tipo P6.





Este ensaio foi realizado seguindo a Norma NBR 7217:1987<sup>(9)</sup>, a qual estabelece limites granulométricos para o agregado miúdo e graúdo em função das porcentagens retidas acumuladas na série de peneiras normal ou intermediária (figura 5) e por meio do cálculo do módulo de finura.

**Figura 5: Peneiras para os ensaios de granulometria**



### 2.3.5 Massa específica aparente

O método empregado para a determinação da massa específica aparente dos grãos de polipropileno aglutinado por meio do frasco de Chapman e seguindo a Norma ABNT NBR 9776:1987 (adaptando-a às características do agregado).

**Figura 6: Frasco de Chapman**





### 2.3.6 Determinação da massa unitária

Atendendo a Norma NBR 7251:1982 <sup>(10)</sup>, a massa unitária dos grãos de polipropileno aglutinado reciclado foi determinada colocando-os em um recipiente de metal em forma de paralelepípedo (volume 15dm<sup>3</sup> e tara de 9,450kg) para se determinar a massa deste material. Em seguida, assim, com a relação massa/volume foi obtida a massa unitária deste material.

### 2.3.7 Resistência à compressão axial

Este ensaio foi realizado seguindo-se a Norma ABNT NBR 7215:1996.

### 2.3.8 Resistência à tração na flexão

Ensaio realizado com base na norma NBR 12142:1992 <sup>(12)</sup>, através da aplicação de carga no centro da superfície superior de uma barra prismática com dimensões de (7,5 x 7,5 x 24,5) cm, respectivamente, altura, largura e comprimento. Esta carga é transmitida à barra através de dois cutelos localizados nos terços médios da barra simplesmente apoiada (figura 7).

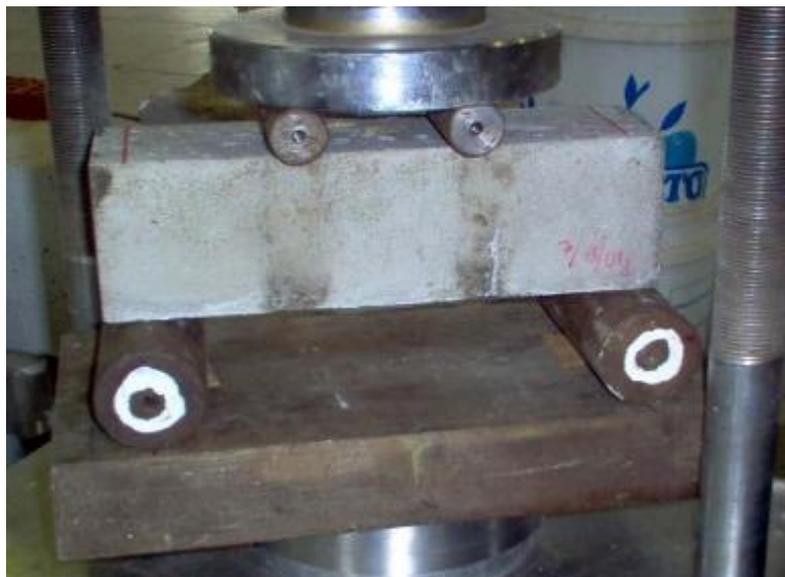


Figura 7: Determinação da resistência à tração na flexão

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Caracterização do grão reciclado aglutinado de polipropileno (GRAPP).

A tabela 1 apresenta os resultados do ensaio de granulometria dos grãos reciclados aglutinados de polipropileno e da determinação das massas específica e unitária deste material.



Tabela 1: Caracterização dos agregados miúdo e GRAPP

Areia				GRAPP			
Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (areia fina)	Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura
2,4	2,62	1,39	1,57	9,5	0,93	0,34	5,81

A tabela 2 apresenta os traços em massa e respectivas misturas utilizadas nos ensaios laboratoriais para a determinação da resistência à compressão axial e da resistência à tração na flexão.

Tabela 2: Características dos traços das misturas com GRAPP

Características Gerais das Amostras e Misturas					Traço em massa (kg)				
Séries	Misturas	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Redução da Massa Específica relativa a P0 ( % )	Substituição da areia pelo GRAPP ( % )	cimento	areia	GRAPP	a/c	aditivo
Referência	P0	2,33	0,00	0,00	1,00	0,20	0,00	0,30	0,01
Série A	P1	2,21	5,30	5,00	1,00	0,19	0,01	0,30	0,01
	P2	2,09	10,60	10,00	1,00	0,18	0,02	0,30	0,01
	P3	1,96	15,80	15,00	1,00	0,17	0,03	0,30	0,01
	P4	1,92	17,60	20,00	1,00	0,16	0,04	0,30	0,01
	P5	1,83	21,30	25,00	1,00	0,15	0,05	0,30	0,01
	P6	1,75	24,80	30,00	1,00	0,14	0,06	0,30	0,01
	P7	1,63	30,00	35,00	1,00	0,13	0,07	0,30	0,01
Série A	P10	1,37	41,50	50,00	1,00	0,10	0,10	0,30	0,01
Série B	P21	1,59	31,90	100,00	1,00	0,00	0,30	0,30	0,01
	P22	1,53	34,20	100,00	1,00	0,00	0,40	0,30	0,01

A tabela 3 apresenta os resultados do ensaio geral dos ensaios referentes aos corpos de prova cúbicos e cilíndricos e as respectivas resistências à compressão axial e à tração na flexão para as misturas da série A e B, com ênfase nos corpos de prova cilíndricos tipo P0, P6, P10 e P22 cilíndricos.



**Tabela 3: Análise dos resultados dos ensaios físico-mecânicos**

Características Gerais das Amostras e Misturas					Análise dos Corpos de Prova					
					Cúbicos		Cilíndricos			
Séries	Misturas	Massa Específica (g/cm³)	Redução da Massa Específica relativa a P0 (%)	Substituição da areia pelo GRAPP (%)	Resistência a Compressão Axial (MPa)	Redução da resistência à Compressão Axial (%)	Compressão Axial		Tração na Flexão	
							Resistência a Compressão Axial (MPa)	Redução (%)	Resistência a Tração na Flexão ou Módulo de Ruptura (MPa)	Redução (%)
Referência	P0	2,33	0,00	0,00	89,97	0,00	89,97	0,00	5,69	0
Série A	P1	2,21	5,30	5,00	68,93	-23,39				
	P2	2,09	10,60	10,00	45,28	-49,67				
	P3	1,96	15,80	15,00	39,24	-56,39				
	P4	1,92	17,60	20,00	37,24	-58,61				
	P5	1,83	21,30	25,00	34,19	-8,19				
	<b>P6</b>	<b>1,75</b>	<b>24,80</b>	<b>30,00</b>	<b>29,51</b>	<b>-67,20</b>	<b>31,96</b>	<b>-64,48</b>	<b>5,59</b>	<b>-1,76</b>
	P7	1,63	30,00	35,00	24,24	-17,86				
Série A	<b>P10</b>	<b>1,37</b>	<b>41,50</b>	<b>50,00</b>	<b>11,26</b>	<b>-87,48</b>	<b>7,55</b>	<b>-91,61</b>	<b>2,16</b>	<b>-62,04</b>
Série B	P21	1,59	31,90	100,00	36,00	-59,99				
	<b>P22</b>	<b>1,53</b>	<b>34,20</b>	<b>100,00</b>	<b>28,15</b>	<b>-68,71</b>	<b>19,02</b>	<b>-78,86</b>	<b>3,15</b>	<b>-44,64</b>

### 3.2 Análise dos resultados relativos ao traço/mistura do tipo P6

Após a substituição dos agregados miúdo e graúdos por grãos de polipropileno e registrando perdas de 64,48% da capacidade de resistir a compressão axial, 35% de resistir à tração por compressão diametral, perda de menos de 2% de resistência na tração por flexão e menos de 17% de perda em seu módulo de elasticidade, o traço P6 ainda manteve a sua capacidade de resistir aos esforços solicitantes de compressão axial acima de 30 MPa.

Cabe ressaltar que esta característica (30 MPa) se aproxima da maioria dos concretos convencionais utilizados em obras de engenharia civil e arquitetura, ou seja, em obras de construção civil em geral incluindo elementos pré-moldados ou pré-fabricados de concreto.

### 3.3 Aspectos visuais

Os corpos-de-prova foram cortados axial e diametralmente e posteriormente digitalizados obtendo-se uma imagem no tamanho real dos mesmos onde se pode visualizar a distribuição dos grãos de polipropileno no interior dos compósitos resultantes.

Este procedimento, embora simples e rudimentar, permitiu verificar que os grãos estavam distribuídos uniformemente, sem a ocorrência de segregação ou concentração na parte superior dos corpos-de-prova, eliminando a hipótese de que, pelo fato de serem extremamente leves (entre 0,89 e 0,93 g/cm<sup>3</sup>), poderiam aflorar na superfície superior dos corpos de prova dos compósitos curados resultantes.



Figura 9: Cortes de seção diametral e transversal do tipo P6.



### 3.4 Produção de blocos de concreto pré-fabricados com o compósito cimentício-polimérico

Como sugestão à aplicação prática dos resultados obtidos por meio deste trabalho, foram fabricados 10 blocos de concreto utilizando como referência a mistura tipo P6. Os materiais foram devidamente dosados no laboratório em Campinas e transportados para a fábrica em Guarulhos.



**Figura 10: Preparação da mistura para a produção de blocos com GRAPP**



O traço inicialmente dosado para se obter a mistura P6 foi ajustado para P3 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAPP 0,06: água/cimento 0,30), mantendo, desta forma, certo grau de segurança para viabilizar o início da fabricação e preservar os equipamentos.

**Figura 11: blocos de concreto com GRAPP (2004)<sup>1</sup>**



Após alguns ajustes, na terceira tentativa, os blocos foram moldados e desmoldados com sucesso, obtendo-se as dimensões previstas de 15,0 x 19,0 x 39,0 cm, correspondentes respectivamente à largura, altura e comprimento e tomando-se como referência a norma ABNT NBR-6136:1994 <sup>(7)</sup>.

---

1 Sr. Sérgio, proprietário da empresa Masei Blocos Ltda., que cedeu suas instalações viabilizando a produção dos blocos com GRAPP.



#### 4. CONCLUSÕES

O uso dos grãos reciclados aglutinados de polipropileno que foram utilizados neste estudo, pode contribuir para a substituição dos agregados minerais convencionais como a pedra britada e a areia, ou quando bem combinados areia e grãos podem oferecer um pacote granulométrico que se apresenta satisfatoriamente fechado, resultando em resistências adequadas a diversas aplicações, em princípio, não estruturais.

A granulometria, o formato arredondado e estriado característico dos grãos de polipropileno permitiu boa aderência ao concreto sem a ocorrência de desprendimentos ou observação de qualquer segregação ou distribuição inadequada deste material no compósito já endurecido.

As misturas de P3 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAPP 0,06: água/cimento 0,30) a P6 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAPP 0,06: água/cimento 0,30), registraram, entre elas, perdas de resistência à compressão axial inferior a 10% , o que sugere que os grãos, a partir 15% a 30% de adição, oferecem os melhores resultados, em termos desta resistência, nos traços com cimento, areia e GRAPP.

O compósito cimentício-polimérico resultante mostrou-se adequado para as aplicações que especifiquem materiais ou concretos capazes de absorver energia de impactos pois não foram observados lascamentos explosivos à medida em que os corpos de prova atingiam os limites de ruptura nos ensaios laboratoriais de resistência à compressão axial e à tração na flexão.

O uso dos grãos reciclados aglutinados de polipropileno no concreto, diminui as densidades aparentes do concreto, possibilitando a obtenção de compósitos leves, porém com elevadas resistências.

O grão reciclado aglutinado de polipropileno (GRAPP) pode ser utilizado como material inerte na construção civil, tendo como vantagens o fechamento do pacote granulométrico, o significativo ganho de ductilidade, a redução do peso das estruturas, a redução do consumo de agregados naturais e a possível redução dos custos diretos e dos preços finais de produtos pré-fabricados impactando diretamente em benefícios ao meio ambiente e ao custo e preço final das habitações.

É possível efetuar a reciclagem do plástico em grande escala para a produção de grãos aglutinados reciclados de polipropileno, destinados ao desenvolvimento de novas aplicações como material para a indústria da construção civil, contribuindo para a redução deste resíduo sólido no meio ambiente e integrando a engenharia civil ao campo das soluções científicas, tecnológicas e práticas, não apenas relativas à ciência e à tecnologia dos materiais, mas também contextualizada na gestão ambiental.

Na prática, novos ensaios devem ser determinantes para retificar e ratificar aplicações para este novo compósito incluindo não apenas a produção de blocos de concreto para alvenaria, mas também o enchimento de lajes nervuradas (concreto leve), defensas rodoviárias para absorção de impactos mecânicos, enchimento de lajes pré-fabricadas sistema BubbleDeck, muros ou paredes filtrantes, tubos de drenagem (concreto cavernoso), painéis e divisórias de concreto pré-fabricados, construções rurais diversas, pisos intertravados ou drenantes, dentre outras aplicações, das quais algumas já se encontram em desenvolvimento.



## REFERÊNCIAS

1. ABIPLAST. **Brazilian Plastic Processed and Recycling Industry 2018 Profile – Preview.** disponível em <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/preview-perfil/> acessado em 14/04/2019 às 13h28min07s.
2. AKINYELE, Joseph Olawale (a); SALIM, Ramhadhan Wanjala (a); OYETI, Gbolahan (b). **Use of recycled polypropylene grains as partial replacement of fine aggregate in reinforced concrete beams.** (a) Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and the Built Environment, Tshwane University of Technology, Pretoria, South Africa, (b) Department of Civil Engineering, Federal University of Agriculture, Abeokuta, 0022 Nigeria Received 28 may 2015; accepted 06 July 2015.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos: procedimento. Rio de Janeiro, 1984.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1980.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 1983.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6136:** bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 1994.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** argamassa e concreto: determinação da resistência à compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7217:** agregado: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987b.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7251:** agregado em estado solto: determinação da massa unitária: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982b.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8522:** concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. método de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12142:** concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.
13. COELHO, R. T. **Contribuição ao estudo da aplicação de materiais alternativos nos compósitos à base de cimento Portland; uso de grão de polipropileno reciclado em substituição aos agregados de concreto.** Campinas: FEC/UNICAMP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005.
14. COELHO, R. T. **A reciclagem do plástico: negócios e meio ambiente.** São Paulo: FEAPUCSP. Dissertação (Mestrado em Administração), Faculdade de Economia,



Administração, Ciências Contábeis e Atuariais, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 1999.

15. RILEM TC 121 - DRG. **Specification for concrete with recycled aggregates: materials and structures**, v. 27, p. 557-559, 1994.
16. SALADO, G. C. **Painel de vedação vertical de tubos de papelão: estudo, proposta e análise de desempenho**. Tese (Doutorado). São Carlos, SP. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. 2011.



## PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADO MIÚDO DE CASCA DE MEXILHÃO

Luiz Felipe Lima Braga Lata <sup>(1)</sup>; Camila Aparecida Abelha Rocha <sup>(2)</sup>;

(1) UFF – luizfelipelata@id.uff.br; (2) UFF – camilaabelha@id.uff.br

### RESUMO

A indústria da maricultura vem crescendo nas regiões costeiras no Brasil, incluindo na praia de Jurujuba – Niterói (RJ), e conseqüentemente a geração de resíduos de casca de mexilhões, causando um problema ambiental. Visando proporcionar uma possibilidade de destino para o resíduo produzido em Niterói, este trabalho teve como objetivo processar a casca de mexilhão para transformá-la em agregado miúdo e caracterizá-la verificando a sua viabilidade de utilização. O processamento consistiu em limpeza, secagem em estufa, lavagem em betoneira por 4 ciclos, nova secagem e trituração do material. Após processamento, o material foi caracterizado por meio dos ensaios físicos de granulometria, massa específica e absorção de água; químicos de composição química, perda ao fogo, composição mineralógica e análise termogravimétrica; e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura. O agregado miúdo produzido apresentou granulometria na zona ótima segundo a NBR 7211:2009, massa específica de 2,64 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 3,23%. A análise química demonstrou que 90% do material é composto por carbonato de cálcio em arranjo cristalino de aragonita e calcita. A morfologia dos grãos foi predominantemente angulosa, com alguma porosidade, fissuras e textura superficial rugosa. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o material produzido a partir de casca de mexilhão cumpriu os requisitos normativos para ser utilizado como agregado miúdo na construção civil.

**Palavras-chave:** Casca de mexilhão, agregado miúdo, processamento, caracterização.

## PROCESSING AND CHARACTERIZATION OF FINE AGGREGATE OF MUSSEL SHELLS

### ABSTRACT

Mariculture industry has been growing in the coastal regions of Brazil, including in Jurujuba beach - Niterói (RJ), and consequently a generation of mussel shell residues, causing an environmental problem. Aiming at a possibility of destination for the residue produced in Niterói, this work intended process the mussel shells to transform in a fine aggregate and characterize it to verify its viability of use. Processing consisted of cleaning, drying, washing in concrete mixer for 4 cycles, re-drying and grinding of material. After processing the material properties was characterized by physical tests of granulometry, density and water absorption; chemical properties as chemical composition, loss of ignition, mineralogical composition and thermogravimetric analysis; and morphological analysis by scanning electron microscopy. The fine aggregate produced had granulometry in optimum zone, according NBR 7211:2009, density of 2.64 g / cm<sup>3</sup> and water absorption of 3.23%. The material is composed about 90% calcium carbonate in a crystalline arrangement of aragonite and calcite. The morphology of the grains was predominantly angular, with some porosity, cracks and rough surface texture. From the obtained results it can be concluded that the material produced from mussel shell fulfilling the normative requirements to be used as fine aggregate in the civil construction.

**Key-words:** mussel shell, fine aggregate, processing, characterization.



## 1. INTRODUÇÃO

Os cultivos de mexilhões da espécie *Perna perna*, no Brasil, surgiram como uma forma de exploração racional dos recursos marinhos e por décadas foram desenvolvidos experimentos em diversas instituições de pesquisa para tornar a atividade uma realidade ao longo de toda a costa das regiões sudeste e sul do país <sup>(1)</sup>.

A indústria de cultivo de mexilhões e ostras de maneira geral apresenta um grande problema que é o acúmulo das cascas desses mariscos nas regiões costeiras. De toda a quantidade de marisco produzida, apenas 20% é consumida na forma alimentar, sendo 80% constituída de casca <sup>(2)</sup>. Os resíduos provindos do consumo de moluscos são um problema ambiental, visto que os produtores nem sempre lhes dão uma destinação adequada, sendo comum depositá-los em terrenos baldios, atraindo insetos e roedores, o que acaba por facilitar a disseminação de doenças infecciosas; outro destino comumente dado a estes resíduos é o mar, causando o assoreamento <sup>(3)</sup>.

A localidade de Jurujuba, Niterói (RJ), possui cultivo de mexilhões com uma pequena produção de cerca de 250 toneladas por ano <sup>(4)</sup>. A produção de mexilhões no Estado de Santa Catarina segundo o IBGE <sup>(5)</sup>, em 2016, foi de 20.828 toneladas, o que corresponde a 97,9% da produção brasileira. Não obstante, os problemas com a disposição das cascas de mexilhões em Jurujuba são os mesmos das grandes regiões produtoras.

Independente da região produtora, deve-se buscar uma alternativa não poluidora em relação a disposição dos resíduos de cascas de mariscos, tornando a atividade mais sustentável, favorecendo o meio ambiente e aos próprios maricultores. É importante que se dê o devido destino às cascas com processamento simples e que agregue valor a esse material.

Os produtos que podem utilizar desta fonte de carbonato de cálcio são: cal virgem, cal hidratada, blocos e pavimentos para construção civil, adubos, pesticidas, rações, cerâmica, tintas, espumas de polietileno, produção de talco, produção de vidros, indústria do cimento, produção de vernizes e borrachas, e correção de solos <sup>(6)</sup>.

Atualmente, a indústria da construção civil é a maior geradora de impacto ao meio ambiente, em seus mais diversificados processos <sup>(7)</sup>. Desde a extração de recursos e matéria-prima, passando pela emissão de gases estufa ao longo de todas as etapas de produção e principalmente na destinação de resíduos.

Sendo assim, devido ao seu grande potencial poluidor, a indústria da construção civil tende cada vez



mais a avaliar formas de tornar seus processos mais “limpos” ou desenvolver formas de mitigar seus impactos utilizando recursos que a princípio seriam descartados e incorporando-os à sua cadeia produtiva. Logo, uma possível destinação para as cascas de mariscos é a construção civil, buscando aumentar a sustentabilidade tanto de sua própria cadeia produtiva, como a do cultivo de mariscos.

Logo, o objetivo deste artigo é produzir agregado miúdo a partir de casca de mexilhão recolhida em Jurujuba, Niterói-RJ e caracterizá-la avaliando a possibilidade de utilizá-la em concretos, argamassas ou outros produtos da construção civil.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

As cascas de mexilhão da espécie *Mytilus perna* foram coletadas diretamente na Associação Livre Maricultores localizada na Av. Carlos Ermelindo Marins 294, Jurujuba, às margens da Baía de Guanabara, no município de Niterói, estado do Rio de Janeiro, no sudeste do Brasil. A Figura 1 apresenta o aspecto do material coletado, com grande quantidade de matéria orgânica.

Figura 1 - Resíduos de mexilhões “in natura” recolhidos na Associação de Maricultores de Jurujuba.



### 2.2. Limpeza e trituração das cascas de mexilhão

A triagem inicial das cascas e primeira lavagem foram feitas manualmente no laboratório de materiais de construção (LAMCO) da UFF apenas com água, no mesmo dia da coleta, para a retirada de matéria orgânica. A Figura 2 apresenta as cascas logo após a primeira triagem e lavagem.

Após a primeira lavagem o material foi seco em estufa à 110°C por 24 horas. As lavagens



subsequentes foram realizadas em betoneira por 10 min com relação de material (kg) e água igual a 1:2 (Figura 3). O objetivo dessa lavagem foi a retirada de sal e matéria orgânica remanescentes. Após a secagem em estufa a retirada de materiais orgânicos ainda presentes nos mexilhões se tornaram bem mais simples.

Figura 2 - Cascas de mexilhão após triagem inicial e primeira lavagem.



Após o término de cada ciclo de lavagem em betoneira, uma amostra de água era colhida para se observar a coloração (Figura 4). Assim verificou-se que após 4 ciclos de água trocada e lavagem na betoneira, o material era considerado limpo, pois não havia mais mudança significativa de coloração na água.

Figura 3 - Lavagem da casca de mexilhão na betoneira.



Figura 4 - Amostras de água retiradas a cada ciclos de lavagem das cascas de mexilhão.



O material limpo retornou a estufa para nova secagem. Em seguida, o material foi então foi triturado no equipamento para triturar blocos de alvenaria Permaq, Modelo TB, 1995 ,Série 090, produzindo



assim o agregado miúdo (Figura 5).

Figura 5 – Aspecto do agregado miúdo produzido a partir da casca de mexilhão.



### 2.3. Caracterização física e morfológica

O agregado miúdo produzido foi caracterizado por meio de ensaios de composição granulométrica de acordo com a NM 248: 2003 <sup>(8)</sup>; absorção de água de acordo com a NM 30:2001 <sup>(9)</sup>. A massa específica foi determinada no Laboratório de estruturas e Materiais (LabEst) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) utilizando o picnômetro à gas hélio AccuPyc 1330 (Micrometrics).

Para análise morfológica dos grãos do agregado de casca de mexilhão, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) elétrons secundários modelo Hitachi TM3000 de baixo vácuo do Labest/UFRJ. As imagens foram obtidas operando no modo *analy*, que intensifica o contraste das imagens. A amostra passante pela peneira 4,75 mm foi aderida ao porta amostras por meio de fita de carbono.

### 2.4. Caracterização química

Para a caracterização química o agregado miúdo de marisco foi cominuído em almofariz e pistilo de cerâmica, até atingir a granulometria capaz de passar pela peneira de malha de 0,15 mm. A composição química em teor de óxidos foi determinada no LabEst/UFRJ por meio de fluorescência de raios-X (FRX), modelo EDX – 720 da Shimadzu. Complementar a esse ensaio foi realizada a perda ao fogo de acordo com a NM 18: 2012 <sup>(10)</sup>.

A análise termogravimétrica foi realizada para quantificar o teor de carbonato de cálcio presente na amostra. A análise foi realizada em um equipamento SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min - de 22 °C até 1000 °C -, com fluxo de



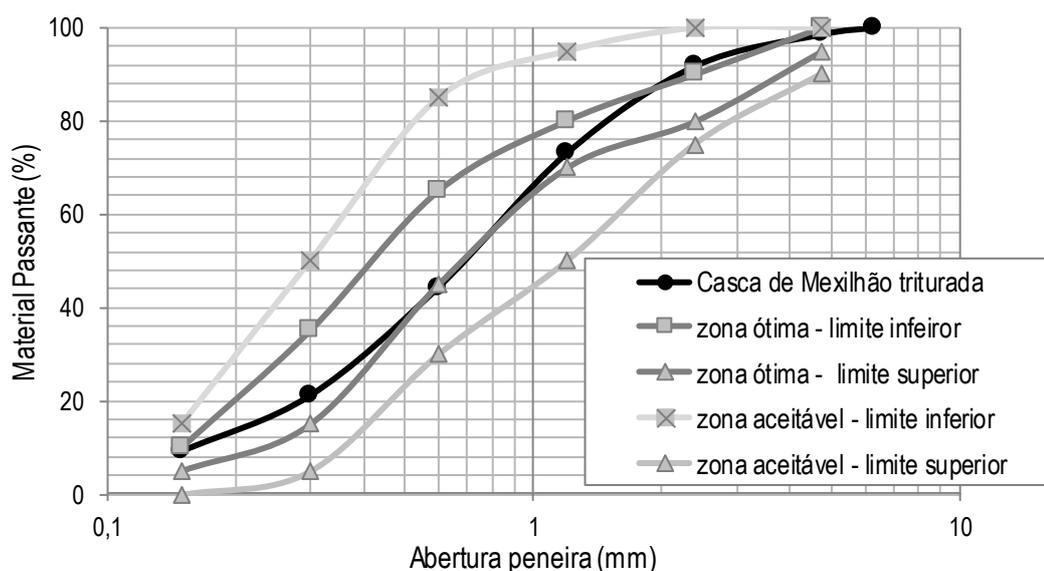
nitrogênio de 100 mL/min e cadinho aberto de alumina. Foi utilizada uma amostra com aproximadamente 10 mg. O ensaio foi realizado no LabEst/UFRJ.

As fases cristalinas presentes no agregado miúdo de marisco foram determinadas em um difratômetro Bruker, modelo D8 Focus, com radiação Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) operando a 40 kV and 40 mA. As varreduras foram realizadas no intervalo de 10-60° (2 $\theta$ ), com passo angular de 0,02° e incremento do passo de 1s. O ensaio foi realizado no LabEst/UFRJ. Para esse ensaio o agregado de casca de mexilhão teve seus grãos reduzidos novamente pois com o tamanho de grãos passantes pela malha de 0,15 mm o material não aderiu ao porta amostras, comprometendo os resultados. Logo foi necessário nova moagem e peneiramento na malha de 0,075 mm.

### 3. RESULTADOS

A Figura 6 apresenta a curva granulométrica do agregado de casca de mexilhão obtido após o processamento. Comparando com as curvas limites definidas pela norma NBR 7211: 2009 <sup>(11)</sup>, pode-se observar que o resultado obtido se enquadra quase completamente dentro da zona ótima para agregado miúdo para concreto, com exceção de dois pontos, que ficaram fora desse limite, porém ainda na zona aceitável.

Figura 6 – Gráfico de distribuição granulométrica de partículas do agregado miúdo produzido a partir de casca de mexilhão e limites da NBR 7211:2009 <sup>(11)</sup>.





O módulo de finura obtido foi de 2,62 e a dimensão máxima característica dos grãos de 4,75 mm, podendo classificar o agregado produzido como miúdo.

A massa específica média encontrada foi de 2,64 g/cm<sup>3</sup> e a absorção de água média de 3,26 %. Esses valores foram bem próximos aos encontrados por Rica (2014) <sup>(12)</sup> de 2,64 g/cm<sup>3</sup> e de 3,65 %, respectivamente.

A composição química obtida por espectrometria de fluorescência de raio X é apresentada na Tabela 1, juntamente com resultados obtidos por diversos autores. Pode se observar que o resultado obtido de 94% de CaO é bem semelhante ao obtido na casca de mexilhão avaliada por Hamester (2010) <sup>(13)</sup> e de Martínez-García *et al.* (2016) <sup>(14)</sup>. Observa-se também que o restante da matriz química é bastante similar, contendo uma pequena quantidade de SiO<sub>2</sub> devido provavelmente a presença de quartzo como contaminante e SO<sub>3</sub> devido a presença de sulfatos.

Tabela 1 – Composição química da casca de mexilhão e comparação de resultados por Hamester (2010) <sup>(13)</sup> e Martínez-García *et al.* (2016) <sup>(14)</sup>.

Composto (%)															
	CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CuO	Br	ZnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>
	94,1	2,36	1,07	1,02	0,53	0,43	0,41	0,05	0,04	0,04	-	-	-	-	-
<sup>(13)</sup>	95,7	0,88	0,66	0,72	0,4	-	0,54	-	-	-	0,63	0,43	-	-	-
<sup>(14)</sup>	94,7	2,58	0,31	-	0,19	-	-	0,01	0,01	-	0,28	-	0,51	0,11	0,01

A média dos resultados obtidos na perda ao fogo foi de 46,73%, bem próximo ao obtido por Yang (2005) <sup>(15)</sup> de 44,16%, que realizou o ensaio com cascas de ostras. A Tabela 2 apresenta os percentuais corrigidos da composição química da amostra de casca de mexilhão considerando a massa total do material. O ensaio de perda ao fogo permite descontar os elementos presentes na amostra que não são identificados na análise química, como CO<sub>2</sub> e orgânicos.

Tabela 2 – Composição química da casca de mexilhão considerando a perda ao fogo.

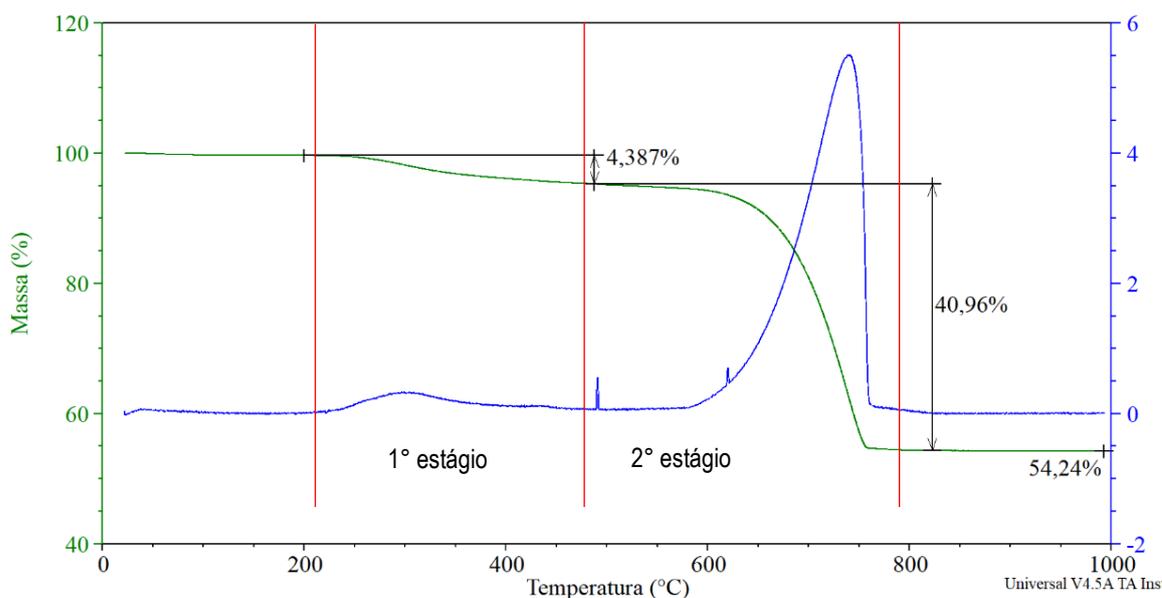
Composto (%)										Perda ao Fogo (%)
CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CuO	Br	ZnO	
50,10	1,26	0,57	0,54	0,28	0,23	0,22	0,03	0,02	0,02	46,73



A Figura 7 apresenta o resultado de análise termogravimétrica obtido para a casca de mexilhão. Pode-se observar que na faixa de aproximadamente de 200°C a 500°C, primeiro estágio, houve uma perda de 4,39%, provavelmente, devido à perda de massa de compostos lignocelulósicos<sup>(16)</sup> de algas aderidas ao material e ,um segundo estágio de 500°C a 850°C com perda de 40,96% na faixa correspondente à perda de CO<sub>2</sub> devido a descarbonatação do carbonato de cálcio.

Hamester (2010)<sup>(13)</sup>, também avaliou a composição química de conchas de mariscos por meio de análise termogravimétrica e apontou que, as cascas de mexilhão apresentam dois estágios de perda de massa com o aumento da temperatura. A primeira perda corresponde a matéria orgânica e a segunda referente ao carbonato de cálcio. No ensaio descrito por<sup>(13)</sup> no primeiro estágio obteve-se uma perda de 8% entre 229°C e 300°C e o segundo estágio ocorreu de 628°C a 749°C, com perda de 38,86%.

Figura 7 – Termogravimetria da casca de mexilhão.



A partir da perda de massa de CO<sub>2</sub>, pode-se obter o percentual de carbonato de cálcio existente na amostra através da relação entre as massas moleculares de carbonato de cálcio e do óxido de cálcio de acordo com a equação A.

$$= \frac{\text{Massa molecular CaCO}_3 (100)}{\text{Massa molecular CaO (44)}} \times \text{percentual CaO (\%)} \quad (\text{A})$$

Logo a quantidade de carbonato de cálcio presente na casca de mexilhão foi de 93,09%. O resultado

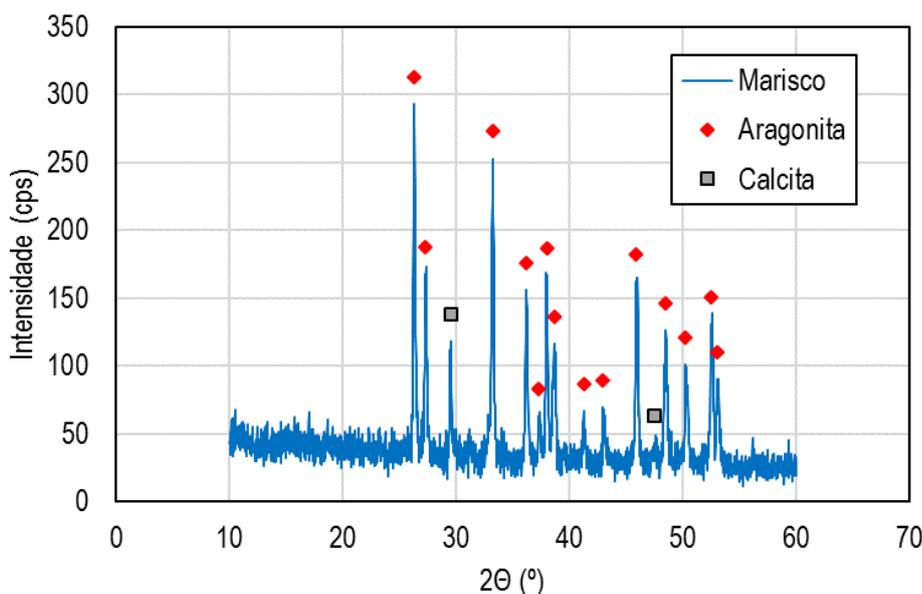


obtido é bem próximo ao apresentado por Yang *et al.*, (2005) <sup>(15)</sup> de 91,16 % e por Martínez-García *et al.*, (2016) <sup>(14)</sup>, de 90,62%.

A Difração de Raio X (DRX), como análise complementar que permite avaliar a composição mineralógica predominantes na amostra e seus respectivos arranjos cristalinos. A Figura 8 apresenta o difratograma obtido com sua respectiva identificação. Os principais minerais encontrados foram os polimorfos do carbonato de cálcio aragonita e calcita.

O resultado encontrado foi bem semelhante aos picos obtidos por Yang *et al.* (2005) nesta mesma análise. Segundo Bessler *et al.* (2008) <sup>(17)</sup>, a aragonita é predominantemente encontrada nos exoesqueletos carbonáticos de corais e moluscos por possuir maior resistência mecânica e massa específica.

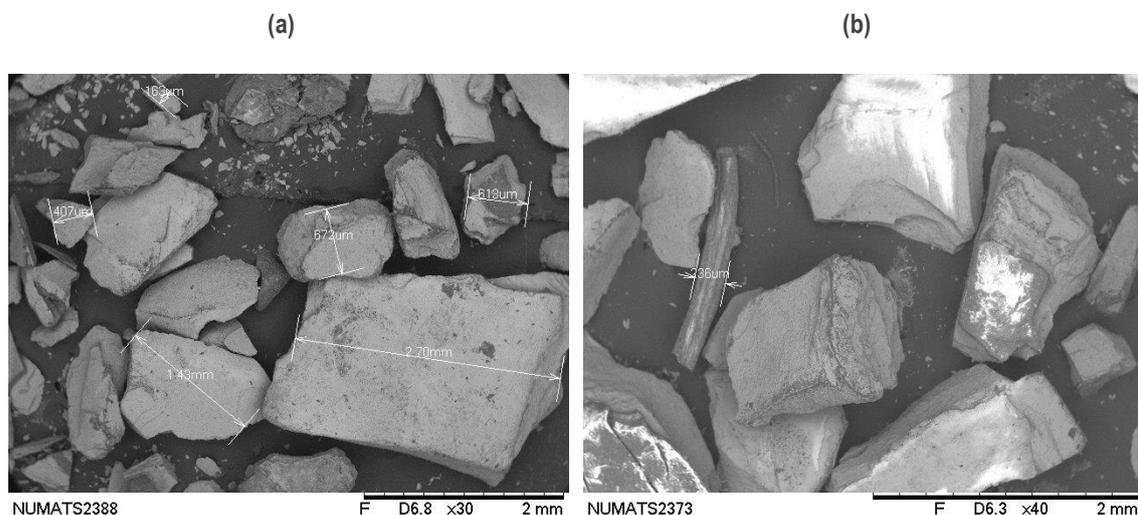
Figura 8 – Difratograma de raios X da casca de mexilhão.



A Figura 9 apresentam imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura. Observaram-se os vários tamanhos dos grãos, variando de 2,7 milímetros a 163 micrômetros, em acordo com o apresentado na composição granulométrica. Além disso observa-se que os grãos são angulosos e com alguma porosidade, além da presença de materiais não minerais, como um pequeno artefato na Figura 9 (b) com geometria cilíndrica, provavelmente alga marinha. A presença desse material corrobora com os resultados de análise térmica que indicou uma pequena perda de massa na faixa de temperatura de degradação de compostos lignocelulósicos.

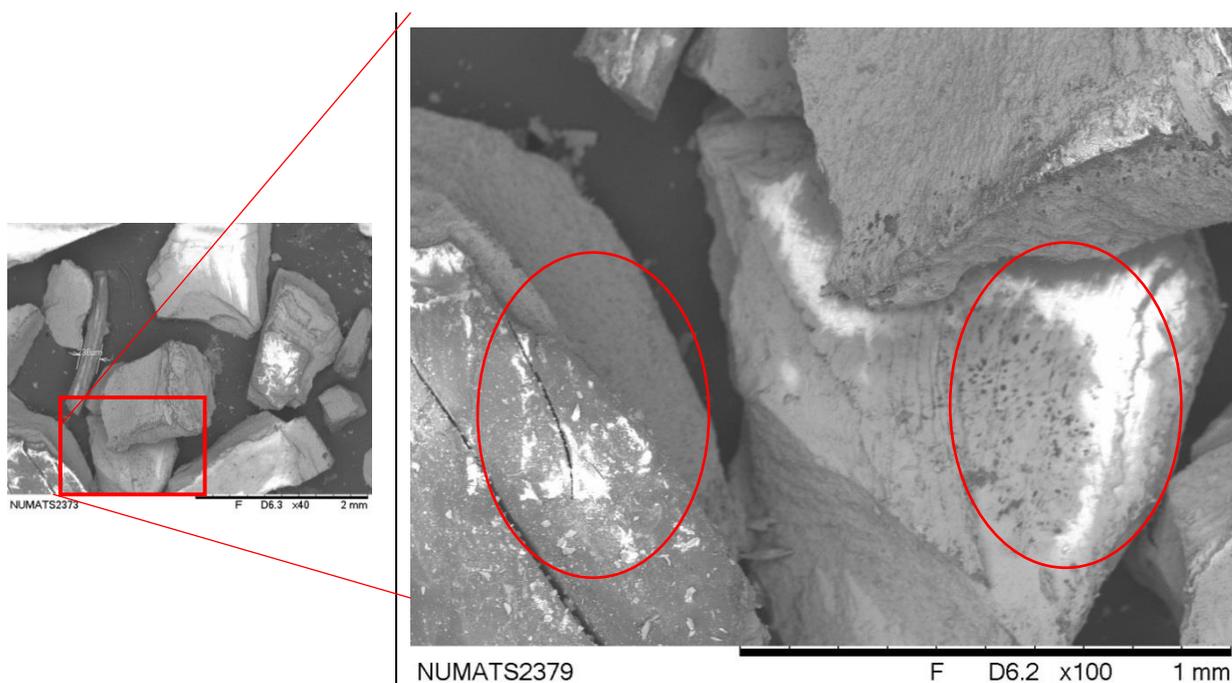


Figura 9 - Imagem de MEV com ampliação de 30 vezes (a) e 40 vezes (b) indicando a variação granulométrica do agregado de casca de mexilhão e a presença de material orgânico.



A Figura 10 apresenta a imagem gerada a partir de uma ampliação correspondente a 100 X de uma área detalhada na Figura 9(b). Nessa imagem é possível observar a porosidade e fissuras nas partículas de agregado miúdo de casca de mexilhão. Essas condições apresentadas fazem com que o material tenha maior absorção de água, pois a água fica retida nessas fissuras e poros. Além disso, observa-se que a textura superficial das partículas apresenta certa rugosidade.

Figura 10 – Imagem de MEV com ampliação de 100 vezes. – Amostra observada no detalhe ampliado na área marcada, ao lado, na Figura 9b.





## 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível tomar as seguintes conclusões:

- O agregado produzido a partir de casca de mexilhão pode ser classificado como agregado miúdo, se posicionando quase que completamente dentro da zona ótima de agregados miúdos definidos pela NBR 7211: 2009.
- O agregado apresenta absorção de água alta, devido à presença de poros e fissuras em sua microestrutura.
- A composição química predominante consistiu em carbonato de cálcio no arranjo cristalino de aragonita e calcita. Em nenhuma das análises químicas foi detectada a presença de sais, logo pode-se dizer que o procedimento de limpeza do material foi efetivo.
- Os resultados da caracterização física e química demonstram que o agregado miúdo produzido a partir de casca de mexilhão tem potencial para ser utilizado na construção civil. No entanto, análises desse material em matrizes cimentícias são necessárias.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao LABEST-COPPE / Numats-Poli UFRJ pelo apoio na realização da caracterização química do material.

## 6. REFERÊNCIAS

1. MARENZI, W, C, A.; BRANCO, J, O.; O cultivo do mexilhão Perna perna no Município de Penha, SC. In: BRANCO, Joaquim Olinto; MARENZI, Adriano W. C. (Org.). **Bases ecológicas para um desenvolvimento sustentável: estudos de caso em Penha, SC**. 291. Editora da UNIVALI, Itajaí, SC. p. 227-244, 2006
2. RÊGO, M, J, A, M.; MOTA, J, M, F.; SILVA, R, F.; SILVA, M, I.; MORAES, Y, B, L. **Avaliação do uso de concha de marisco como agregado miúdo na produção de argamassa para revestimento de piso**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Recife, PE, 2016.
3. MATOS, L, F, S.; RHODEN, A, B.; LIMA R, G, B. **Desenvolvimento de blocos de cimento de Portland com resíduos de maricultura em substituição da areia**. Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves, 2017.
4. O GLOBO . **Expansão da maricultura em Jurujuba, que já foi premiada pela ONU, agora preocupa navegantes**. 2015. Disponível em < [oglobo.globo.com/rio/bairros/expansao-da-maricultura-em-jurujuba-que-ja-foi-premiada-pela-onu-agora-preocupa-navegantes-15961888](http://oglobo.globo.com/rio/bairros/expansao-da-maricultura-em-jurujuba-que-ja-foi-premiada-pela-onu-agora-preocupa-navegantes-15961888) > Acesso em 08/01/2019.



5. IBGE. **Típicos de Santa Catarina, moluscos estão pela primeira vez no Censo Agro**. 2018. Disponível em < [agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/19621-tipicos-de-santa-catarina-moluscos-estao-pela-primeira-vez-no-censo-agro](http://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/19621-tipicos-de-santa-catarina-moluscos-estao-pela-primeira-vez-no-censo-agro) > Acesso em 08/01/2019.
6. CHIERIGHINI, D.; BRIDI, R.; ROCHA, A, A.; LAPA, K, R. **Possibilidade do uso das conchas de molusco**. 3rd International Workshop | Advances in Cleaner Production. São Paulo. 2011.
7. ARAÚJO, V, M.; **Práticas recomendadas para a gestão mais sustentável de canteiro de obras**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.
8. ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2003.
9. \_\_\_\_\_. **NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. 2001.
10. \_\_\_\_\_. **NM 18: Perda ao fogo**. 2012.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: 2009.
12. CUADRADO-RICA, H., SEBAIBI, N., BOUTOUIL, M., BOUDART, B. Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells. **Materials and Structures**, v. 49, n. 5, p. 1805-1816, 2016
13. HAMESTER, M, R, R.; BECKER, D. **Obtenção de carbonato de cálcio a partir de conchas de mariscos**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat. Campos do Jordão. 2010.
14. MARTÍNEZ-GARCÍA, C.; GONZÁLES-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO-LÓPEZ, D. Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. **Construction and Building Materials**, 139, 570-583, 2016.
15. YANG, E.; Yi, S.; LEEM, Y. Effect of oyster Shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part 1. Fundamental properties. **Cement and Concrete Research**, 35(11), 2175-2182., 2005.
16. ZHOU, H.; LONG, Y.; MENG, A,; CHEN, S.; LI, Q.; ZHANG, Y. A novel method for kinetics analysis of pyrolysis of hemicellulose, cellulose, and lignin in TGA and macro-TGA. **RSC Advances**, v. 5, n. 34, p. 26509-26516, 2015.
17. BESSLER, K, E.; RODRIGUES, L.C. Os polimorfos de carbonato de cálcio – uma síntese fácil de aragonita. **Química Nova**, Vol. 31, No. 1, 178-180, 2008.



## **Análise bibliográfica do uso de adições pozolânicas e métodos de mistura modificados em concretos de agregados reciclados**

**Guilherme Victor de Oliveira Alves <sup>(1)</sup>; Flávia Spitale Jacques Poggiali <sup>(2)</sup>; Rogério Cabral de Azevedo <sup>(3)</sup>**

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – guilhermevictoralves2@gmail.com; (2) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – flaviaspitale@gmail.com; (3) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – rogerio@civil.cefetmg.br

### **RESUMO**

A crescente demanda por agregados naturais, a diminuição de suas reservas, o aumento na geração de resíduos de construção civil (RCC) e o descarte desses detritos têm se tornado importantes questões econômicas e ambientais. A reciclagem dos RCC na forma de agregados graúdos reciclados (AGR) utilizados em concretos é uma alternativa para mitigar os problemas relacionados à sua disposição e ao aumento da pressão sobre agregados naturais. A utilização dos AGR, no entanto, prejudica as propriedades do compósito. Modificações nos métodos de mistura de concreto e adições de materiais pozolânicos podem vir a mitigar o problema, melhorando a performance dos concretos de agregados reciclados, contribuindo para maior aceitação e emprego do material. Utilizando a metodologia ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), foi montado um portfólio que constitui o estado da arte acerca de métodos de mistura modificados e adições pozolânicas em concretos produzidos com diferentes níveis de AGR. Foi realizada uma análise quantitativa e qualitativa do efeito do uso de métodos de mistura modificados e adições pozolânicas, identificando quais os métodos e adições mais eficientes. Após análise, foi verificado que os métodos que utilizam sílica ativa, misturada encapsulando os AGR, proporcionam maiores ganhos de resistência à compressão aos concretos de agregados reciclados.

**Palavras-chave:** concreto de agregados reciclados, pozolanas, método de mistura, ProKnow-C

## **Bibliographic analysis of the use of pozzolanic additions and modified mixing methods in recycled aggregate concretes**

### **ABSTRACT**

The growth in demand for natural aggregates, their diminishing reserves, the increased generation of construction waste and the disposal of this waste have become important economic and environmental matters. Recycling construction waste as coarse recycled aggregates in concretes is an alternative to mitigate the issues related to their disposal and the increasing pressure on natural aggregates. However, the use of recycled aggregates in concrete jeopardizes its performance. Modified concrete mixing approaches and the use of pozzolanic materials may lessen the issue, improving the performance of recycled aggregate concretes, contributing to a greater acceptance and use of the material. Using the ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*) methodology, a state-of-the-art research portfolio concerning modified mixing methods and pozzolanic additions to recycled aggregate concretes was assembled. A qualitative and quantitative analysis about pozzolanic additions and mixing methods was performed, identifying which are the most effective mixing methods and pozzolan additions. After the analysis, it was pointed that mixing methods with addition of silica fume enveloping the recycled aggregates improved the concrete's compression performance the most.

**Key-words:** recycled aggregate concrete, pozzolans, mixing method, ProKnow-C



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por grande parte dos resíduos destinados a aterros no mundo e por até 30% das emissões anuais de gases do efeito estufa, como dióxido de carbono <sup>(1,2)</sup>. Apenas a produção de cimento é responsável por 5% das emissões globais de CO<sub>2</sub> <sup>(3)</sup>. Uma das maneiras de mitigar o impacto ambiental associado ao setor é reduzir o consumo de cimento em traços de concreto por meio de sua substituição parcial por materiais pozolânicos <sup>(4)</sup>.

Os resíduos da construção civil (RCC), originados por atividades produtivas do setor, são, em sua maior parte, destinados a aterros ou dispostos ilegalmente. Sua relevância tem aumentado, frente à escassez de terrenos para aterros e à alta demanda mundial por agregados naturais, fazendo com que sejam considerados um recurso em potencial para diversos propósitos. Apesar de influenciarem o comportamento do concreto de maneira negativa, é possível reciclá-los e utilizá-los como agregados. À porção graúda dos RCC utilizados como agregados em concretos dá-se o nome de agregados graúdos reciclados (AGR) <sup>(5-7)</sup>.

Os AGR possuem pior qualidade quando comparados aos agregados graúdos naturais (AGN), especialmente devido à sua camada de argamassa aderida e à fraca zona de transição interfacial (ZTI) entre agregado original e camada de argamassa. O concreto de agregados reciclados possui duas ZTI, uma entre a nova matriz de cimento e agregado reciclado e a outra entre agregado reciclado e a argamassa antiga a ele aderida. As ZTI são pontos fracos no concreto de agregados reciclados, contribuindo para o pior desempenho do material, comparado ao concreto de agregados naturais <sup>(6,8-15)</sup>. Métodos para aprimorar as propriedades dos AGR têm sido desenvolvidos, consistindo em remover a argamassa aderida ao agregado original ou modificá-la, melhorando suas propriedades <sup>(16,17)</sup>. O uso de materiais pozolânicos e de métodos de mistura modificados são tratamentos de baixo custo associado, capazes de melhorar a microestrutura do concreto de agregados reciclados, possibilitando-o atingir resistência mecânica e durabilidade equiparáveis a concretos produzidos com uso de agregados naturais <sup>(18-24)</sup>.

O presente estudo visa selecionar e, posteriormente, analisar um portfólio acerca de métodos de mistura e adições pozolânicas em concretos de agregados reciclados, identificando os efeitos de tais tratamentos nas propriedades mecânicas e na microestrutura de concretos de agregados reciclados. Para seleção e análise de artigos, utilizou-se o método de análise sistêmica ProKnow-C.



## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Enquadramento metodológico

O enquadramento metodológico de um estudo depende do assunto abordado, seus objetivos e os meios utilizados para obtenção de dados. O enquadramento metodológico da presente pesquisa considera os seguintes aspectos: natureza, método de abordagem, objetivos, procedimentos técnicos e instrumentos de pesquisa (25-27). Sua classificação é mostrada na Tabela 1:

Tabela 1 - Enquadramento metodológico do estudo

Aspecto da pesquisa	Classificação da pesquisa
Natureza	Aplicada
Método de abordagem	Qualitativa e quantitativa
Objetivos	Exploratória
Instrumento de pesquisa	Proknow-C
Procedimentos técnicos	Bibliográfica

### 2.2. Procedimento para seleção e filtragem de artigos

Para realização desta pesquisa foi adotado o método de revisão sistêmica ProKnow-C, possibilitando a seleção e análise de um portfólio bibliográfico de artigos que abordem os efeitos do uso de métodos de mistura alternativos e adições pozolânicas em concretos fabricados com resíduos de construção e demolição, utilizados como agregados reciclados (28). Com o tema da pesquisa definido, foram adotadas seis palavras-chave: “*Recycled aggregate concrete*” (PC1), “*Recycled aggregate*” (PC2), “*Interfacial Transition Zone*” (PC3), “*Mixing Method*” (PC4), “*SCM*” (“*Supplementary cementing materials*”) (PC5), “*Microstructure*” (PC6). As mesmas foram agrupadas em grupos de três, totalizando 20 combinações. Foram pesquisadas cinco bases, com acesso disponível pelo portal de periódicos CAPES (29), retornando 4196 artigos. Conforme mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Bases de busca e artigos retornados

Bases de busca	Artigos retornados
Science Direct	2138
Technology Collection	894
Web of Science	490
Scopus	366
Compendex	308
<b>Total</b>	<b>4196</b>



Foi realizada uma filtragem do portfólio com auxílio do gestor de referências Mendeley Desktop, eliminando duplicatas, livros e reedições de artigos. O material selecionado, denominado portfólio bibliográfico, foi reduzido a 1598 artigos. Foram então lidos os títulos dos artigos do portfólio, verificando sua adequabilidade ao tema proposto pela pesquisa, identificando 61 artigos com título totalmente alinhado ao tema. Em sequência, foi realizada a filtragem do portfólio por relevância acadêmica. Por meio do Google Acadêmico, foram buscadas e contabilizadas as citações de cada um dos 61 artigos. O ponto de corte para permanência no portfólio foi estabelecido em 85% do total das citações, sobrando 23 artigos. Os 23 artigos tiveram seus resumos analisados, 7 foram descartados, permanecendo 16. Foi realizada uma análise dos trabalhos presentes no portfólio inicial com datas recentes, que pertencem a autores já incluídos no portfólio e que não foram selecionados na etapa de relevância acadêmica. Foram adicionados 8 artigos, resultando na leitura integral de 24. Após leitura, 12 foram descartados por não se alinharem ao tema de pesquisa. Os 12 artigos selecionados que constituem o portfólio bibliográfico final são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Artigos selecionados para o portfólio final (ordem cronológica)

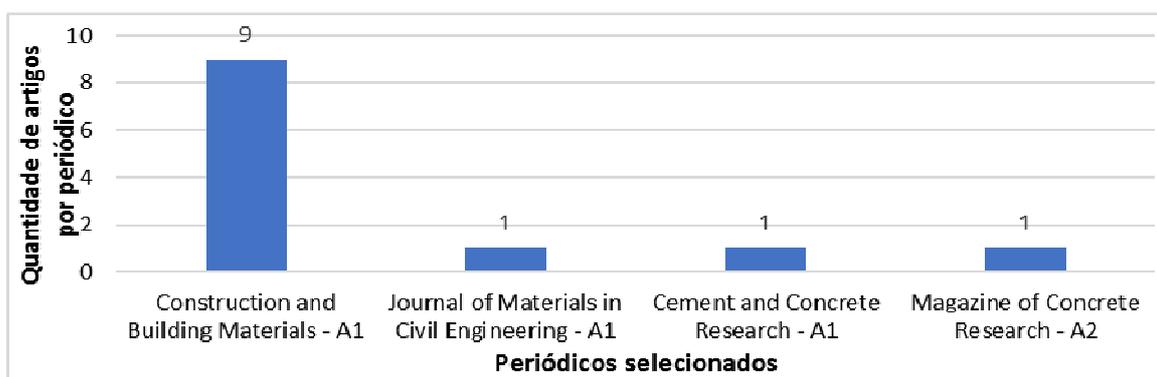
Autores	Título do artigo e referência
Otsuki <i>et al.</i> , (2003)	Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete <sup>(30)</sup> .
Tam <i>et al.</i> , (2005)	Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach <sup>(21)</sup> .
Tam <i>et al.</i> , (2006)	Comparing Performance of Modified Two-Stage Mixing Approach for Producing Recycled Aggregate Concrete <sup>(31)</sup> .
Tam <i>et al.</i> , (2008)	Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA <sub>sc</sub> <sup>(23)</sup> .
Li <i>et al.</i> , (2009)	Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete <sup>(20)</sup> .
Corinaldesi <i>et al.</i> , (2009)	Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete <sup>(32)</sup> .
Kong <i>et al.</i> , (2010)	Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete <sup>(19)</sup> .
Abd Elhakam <i>et al.</i> , (2012)	Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete <sup>(18)</sup> .
Li <i>et al.</i> , (2012)	Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches <sup>(33)</sup> .
Brand <i>et al.</i> , (2015)	Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete <sup>(34)</sup> .
Rajhans <i>et al.</i> , (2018)	Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ <sup>(35)</sup> .
Zhang <i>et al.</i> , (2019)	Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete <sup>(36)</sup> .



### 2.3. Análise bibliométrica do portfólio

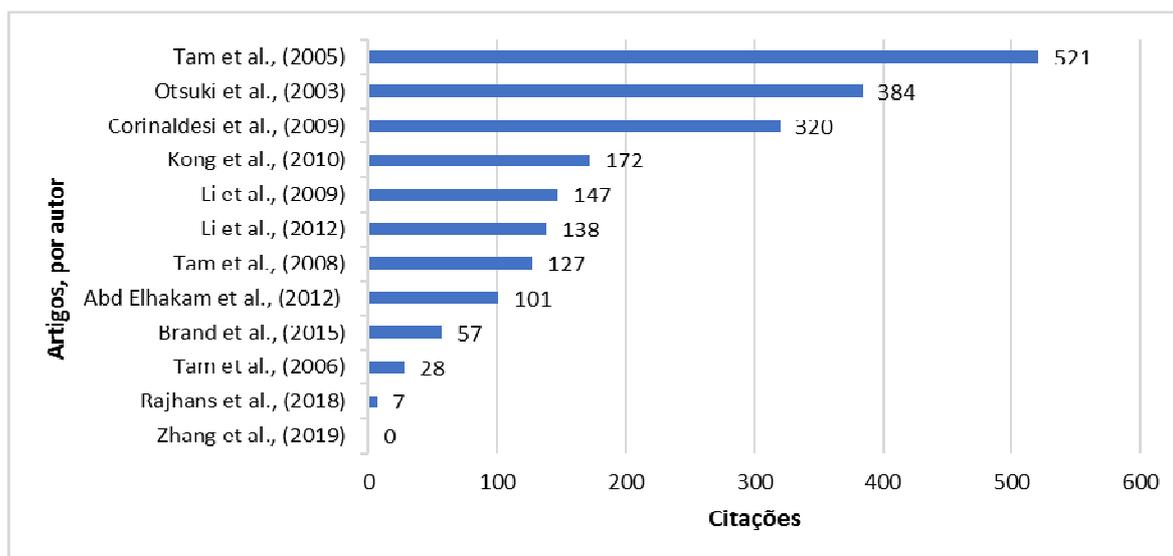
A análise bibliométrica do portfólio estima a relevância dos artigos selecionados e os periódicos onde foram publicados. A quantidade de artigos pertencentes a cada periódico e sua classificação, segundo o sistema Qualis-Capes <sup>(29)</sup>, é mostrada pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Destaca-se, contribuindo para justificar a relevância do portfólio obtido, que dos quatro periódicos que englobam o portfólio, três são classificados pela CAPES como A1 e um é classificado como A2.

Figura 1 - quantidade de artigos por periódico e classificação dos periódicos



A análise de relevância acadêmica dos artigos selecionados é ilustrada pela Figura 2 e foi realizada com auxílio do Google Acadêmico, por meio da contagem de citações, desde o momento de sua publicação até a data em que esta etapa foi conduzida:

Figura 2 - Relevância do portfólio por reconhecimento acadêmico





## 2.4. Análise sistêmica dos artigos selecionados

A análise sistêmica do portfólio procura analisar cada artigo sob a ótica de lentes de pesquisa, identificando lacunas e oportunidades para novas pesquisas, destacando os principais pontos do portfólio. Foram definidas as lentes de pesquisa, conforme Tabela 4 e, em seguida, foi realizada a análise do conteúdo dos 12 artigos selecionados.

Tabela 4 - Lentes de pesquisa adotadas

Lente	O que busca
Métodos de mistura de concretos de agregados reciclados	Identificar os métodos de mistura de concreto utilizados pelos artigos e seus efeitos nas propriedades do concreto.
Níveis substituição de AGN por AGR	Listar níveis de substituição de AGN por AGR.
Propriedades avaliadas	Relatar os ensaios conduzidos pelo estudo.
Uso de materiais pozolânicos como adição ao concreto	Identificar as adições utilizadas, os níveis de adição e seus efeitos nas propriedades do concreto.

## 2.5. Aspectos abordados pelo portfólio

O estudo de Otsuki *et al.*, (2003) <sup>(30)</sup> buscou avaliar a influência do uso de 100% de AGR na zona de transição interfacial, resistência mecânica, resistência à penetração de cloretos e à carbonatação de concretos, propondo, para melhoria de tais propriedades, um método de mistura duplo, denominado *Double Mixing Approach* (DM). O método consiste em adicionar a água de mistura do traço em dois momentos distintos: em uma primeira etapa, junto aos agregados miúdos e graúdos, e posteriormente, após os outros componentes do concreto serem colocados. A resistência à compressão e à tração (28 dias) foram melhoradas em 12,9% e 22,2%, respectivamente, comparando-se a concretos produzidos pelo método de mistura convencional, ou *Normal Mixing Approach* (NMA). A resistência à penetração de íons cloreto foi melhorada em 22,7% e a resistência à carbonatação em 12,3% <sup>(30)</sup>.

Tam *et al.*, (2005) <sup>(21)</sup> elaboraram um método de mistura semelhante proposto por Otsuki *et al.*, (2003) <sup>(30)</sup>, nomeado *Two Stage Mixing Approach* (TSMA), adicionando água à mistura de concreto em duas etapas distintas. A primeira metade da água é utilizada na formação de uma fina camada de cimento na superfície dos agregados miúdos e graúdos, permeando os poros da superfície dos AGR e preenchendo vazios e fissuras. A água restante é adicionada em uma segunda etapa. Foram produzidos concretos com 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de AGR, por meio do TSMA e do NMA, o último sendo utilizado como referência. Os concretos tiveram sua microestrutura e resistência à compressão avaliadas. O emprego do TSMA proporcionou o fortalecimento das ZTI, melhorando a resistência à compressão aos 28 dias em até 21,19%, em comparação ao traço de referência <sup>(21)</sup>.



Tam *et al.*, (2006) <sup>(31)</sup> e Tam *et al.*, (2008) <sup>(23)</sup> elaboraram quatro métodos de mistura distintos, derivados do TSMA, utilizando o mesmo traço de concreto que a pesquisa de Tam *et al.*, (2005) <sup>(21)</sup> e agregados reciclados de mesma origem. Os estudos de 2006 e 2008 avaliaram misturas de concreto com teores de 5, 10, 15, 20, 30 e 35% de AGR, produzidas pelos métodos propostos e comparadas a traços de referência, produzidos segundo o NMA <sup>(21,23,31)</sup>.

Os procedimentos oriundos do estudo de Tam *et al.*, (2006) <sup>(31)</sup> são denominados TSMaP1 (proporcional 1) e TSMaP2 (proporcional 2). Os métodos diferem do TSMA por utilizarem uma camada de pasta de cimento para cobrir apenas a superfície dos AGR durante a primeira etapa da mistura, enquanto o TSMA utiliza a pasta de cimento para cobrir agregados miúdos, agregados graúdos naturais e AGR. Durante a primeira etapa, o TSMaP1 adiciona cimento e água aos agregados graúdos, enquanto o TSMaP2, na mesma parte do processo, adiciona apenas cimento aos agregados graúdos, formando uma camada de pasta de cimento com menor quantidade de água ao redor dos AGR, comparado ao TSMaP1. As misturas foram avaliadas segundo a resistência à compressão aos 28 dias, módulo de elasticidade e microestrutura. Com uso do TSMaP1 e do TSMaP2 foram alcançadas melhoras na resistência à compressão aos 28 dias de até 11,47% e 19,75%, respectivamente, e de até 16,48% e 13,19% no módulo de elasticidade, comparando-se ao traço produzido pelo NMA. O TSMaP2 apresentou melhores resultados que o TSMaP1, o que, segundo os autores, deu-se devido ao menor fator *a/c* na zona de transição interfacial entre agregados reciclados e nova matriz cimentícia <sup>(31)</sup>.

Tam *et al.*, (2008) <sup>(23)</sup> propuseram o TSMAs e o TSMAsc, adicionando material pozzolânico ao concreto de agregados reciclados e dividindo em partes a água de mistura. O primeiro processo adiciona apenas 2% de sílica ativa, em peso do cimento, misturada aos agregados reciclados em um processo de pré mistura do concreto. O segundo método adiciona cimento e 2% de sílica ativa durante a mesma etapa. Os traços produzidos foram avaliados segundo módulo de elasticidade, microestrutura, resistência à compressão, flexão e tração por compressão diametral e comparados a um concreto de referência, produzido pelo NMA. As resistências à tração e à flexão e o módulo de elasticidade foram melhorados. A resistência à compressão foi aprimorada em até 19,5% e 19,73% com uso do TSMAs e o TSMAsc, respectivamente. Os métodos proporcionaram aos AGR serem cobertos por camadas de sílica ativa, diminuindo a porosidade da ZTI, aumentando sua densidade e a aderência entre AGR e pasta de cimento, resultando em uma melhor microestrutura <sup>(23)</sup>.

Li *et al.*, (2009) <sup>(20)</sup> continuaram a avaliação do uso de adições pozzolânicas ao concreto de agregados reciclados, utilizando-as de maneira a encapsular os AGR. Parte da água do traço é misturada às



adições, formando uma pasta com fator  $a/c$  relativamente baixo. Os AGR são então imersos e envoltos pela pasta, para serem agitados. São adicionados, em sequência, os demais componentes do concreto. Os autores deram o nome de *Stone Enveloped with pozzolanic powder* (SEPP) ao método de mistura proposto, produzindo traços de concreto com 100% de AGR, substituindo 10 e 20% do cimento, em peso, por cinzas volantes, sílica ativa e/ou escória de alto-forno. Avaliaram-se trabalhabilidade, microestrutura (por meio de MEV) e resistência à compressão e à flexão dos concretos produzidos, utilizando diferentes métodos de mistura (SEPP e NMA), níveis e tipos de adições. O uso do SEPP combinado às adições pozolânicas proporcionou ao concreto atingir níveis satisfatórios de trabalhabilidade e aprimorou, em até 45,40% e 30,54%, as resistências à compressão e flexão, respectivamente. A microestrutura do material foi melhorada, obtendo-se uma ZTI mais densa entre agregado e pasta de cimento, comparando-se ao traço de referência, produzido pelo NMA. Os melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos para o concreto com adição de 10% de sílica ativa e 10% de cinzas volantes, produzidos pelo SEPP <sup>(20)</sup>.

Elhakam *et al.*, (2012) <sup>(18)</sup> produziram concretos com níveis de 25, 50, 75 e 100% de AGR, avaliando o efeito de três técnicas para melhora das propriedades do produto: método de auto-cura, método de mistura TSMA e adição de 10% de sílica ativa em peso do cimento, utilizada de maneira a encapsular os AGR, como conduzido por Li *et al.*, (2009) <sup>(20)</sup>. Os traços foram ensaiados por resistência à compressão, tração por compressão diametral, resistência de aderência e porosidade. No procedimento de auto-cura os AGR foram imersos em água durante 30 dias antes da concretagem, contribuindo para reação de partículas não hidratadas de cimento. As três técnicas aprimoraram a resistência à tração e de aderência e diminuíram a porosidade dos concretos, comparando-se a um traço de referência, produzido pelo NMA. Com o emprego da auto-cura, do TSMA e da adição de 10% de sílica ativa foram obtidos ganhos na resistência à compressão (28 dias) de 11,63%, 20,47% e 37,2%, respectivamente <sup>(18)</sup>.

Corinaldesi *et al.*, (2009) <sup>(32)</sup> abordaram o uso de pozolanas combinadas ao TSMA, produzindo traços de concreto com 100% de agregados reciclados, grãos e miúdos. Foram utilizadas adições de 15% de sílica ativa, sem substituição do cimento e de 30% de cinzas volantes (em peso do cimento), substituindo parcialmente os agregados miúdos. Os traços foram ensaiados, na primeira parte do estudo, por resistência à compressão e módulo de elasticidade. Na segunda parte, foram avaliados estrutura de poros, resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade, resistência de aderência, retração por secagem, carbonatação e resistência à penetração de íons cloreto de traços contendo adição de apenas cinzas volantes, em 38% do peso do cimento. O uso



de cinzas volantes em substituição ao agregado miúdo ocasionou ganhos de aproximadamente 50% na resistência à compressão aos 28 dias, comparando-se ao concreto com 100% de AGR e sem adições minerais, contribuindo para aprimorar também a aderência concreto-aço e resistência à penetração de íons cloreto e reduzindo tamanho e quantidade de poros <sup>(32)</sup>.

Rajhans *et al.*, (2018) <sup>(35)</sup> elaboraram uma variação do TSMA, denominada TSMA<sub>sfc</sub> (*silica fume, fly ash, cement*), encapsulando os AGR na primeira etapa da mistura, como no SEPP, com sílica ativa e uma porcentagem do cimento. Na segunda etapa são adicionados o restante do cimento, cinzas volantes, água, areia e aditivo superplastificante. Foram produzidos concretos auto adensáveis com 20, 40, 60 e 100% de AGR, adições de sílica ativa em 2, 4, 6, 7 e 8%, e adição de 34,78% de cinzas volantes. Os traços foram avaliados segundo densidade, trabalhabilidade, resistência à compressão, à flexão, à tração e módulo de elasticidade, tendo sua microestrutura avaliada por microanálise de sonda de elétrons. Foi alcançada uma melhora de até 17,61% na resistência à compressão (28 dias) dos concretos produzidos pelo TSMA<sub>sfc</sub>, comparados aos produzidos pelo NMA. Os outros aspectos mecânicos avaliados e a microestrutura apresentaram melhora com o uso do método proposto e as adições. Os traços produzidos pelo TSMA<sub>sfc</sub> com 100% de AGR atingiram até 90,77% da resistência à compressão de traços produzidos com 100% de agregados naturais <sup>(35)</sup>.

Baseando-se em pesquisas anteriores, Kong *et al.*, (2010) <sup>(19)</sup> elaboraram um método de mistura em três etapas para concretos de agregados reciclados, denominado *Triple Mixing Method* (TM), consistindo em misturar inicialmente os agregados miúdos e graúdos a uma parte da água do traço, adicionando em seguida as adições pozolânicas, encapsulando-os, combinando o SEPP e o *Double Mixing Method* (DM). A mistura é finalizada com adição do cimento, aditivo superplastificante e água. Foram produzidos traços por três métodos de mistura (NMA, DM, TM), com 100% de AGR, adições de cinzas volantes e escória de alto-forno. Os concretos foram ensaiados segundo resistência à compressão e resistência à penetração de íons cloreto, tendo sua microestrutura avaliada por MEV. O emprego do TM com uso de adições aprimorou a resistência à compressão em até 30,75% e 25,73%, comparando-se a traços produzidos pelo NMA e DM, respectivamente. O método proposto afetou de maneira positiva a resistência à penetração de íons cloreto e a microestrutura. O TM facilitou a reação das adições pozolânicas com os cristais de Ca(OH)<sub>2</sub> presentes nos poros dos agregados reciclados, formando produtos de hidratação e fortalecendo a ZTI do concreto. Os concretos com 100% de AGR produzidos pelo método obtiveram resistência à compressão de até 99,5% da resistência à compressão de concretos com 100% de agregados naturais, produzidos pelo método de mistura convencional (NMA) <sup>(19)</sup>.



Zhang *et al.*, (2019) <sup>(36)</sup> buscaram otimizar o TM, promovendo uma maior densificação das ZTI, em um método chamado *Optimized Triple Mixing Method* (OTM). Os diferenciais do OTM em relação a métodos anteriores são: adição de materiais pozolânicos diretamente aos agregados graúdos, antes dos outros componentes do concreto; processo de adição e cálculo da quantidade de água no traço, adicionando 80% da água de mistura em uma primeira etapa e levando em conta a capacidade de absorção de água de todos os agregados e adições envolvidos; adição do superplastificante ao concreto juntamente com os materiais pozolânicos, promovendo sua dispersão e facilitando a formação de uma camada de encapsulamento dos AGR com baixo fator água/cimento. Foram ensaiados concretos com 100% de AGR e 30% de agregados miúdos reciclados, adições de 10% de sílica ativa e 10% e 20% de cinzas volantes, avaliando resistência à compressão, gelo e degelo e a impermeabilidade dos concretos produzidos. O emprego do OTM aprimorou em 8,4% e 19% a resistência à compressão dos concretos, comparados aos produzidos pelo DM e TM, respectivamente, além de aumentar sua impermeabilidade e a resistência a ciclos de gelo-degelo. O método aumentou a concentração de pozolanas nas ZTI, otimizando sua estrutura de poros, diminuindo porosidade e o tamanho dos poros no local, contribuindo positivamente para as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto <sup>(36)</sup>.

Brand *et al.*, (2015) <sup>(34)</sup> avaliaram os efeitos dos métodos de mistura NMA e TSMA, combinados a três diferentes condições de umidade dos AGR: secos ao forno (OD), saturados superfície úmida (SSD) e parcialmente saturados superfície úmida (80% SSD). Os traços foram produzidos com 100% de AGR, adição de 20% de cinzas volantes e avaliados por trabalhabilidade, retração, resistência à compressão, tração e flexão. A condição OD foi obtida por colocação dos AGR em um forno, a 105°C, 24 horas antes da concretagem. Os agregados com superfície saturada úmida (SSD) foram imersos em água por 24 horas, antes da concretagem, removendo em seguida a umidade restante, até atingirem a condição estipulada. A condição de 80% SSD foi obtida por meio de pulverização com água dos agregados graúdos, 24 horas antes da concretagem, colocando-os em ambiente de temperatura controlada, para evaporação do excesso de água. A combinação do TSMA e AGR na condição de umidade 80% SSD produziu, dentro do estudo, os concretos de agregados reciclados com os maiores valores de resistência à compressão <sup>(34)</sup>.

Li *et al.*, (2012) <sup>(33)</sup> buscaram maior entendimento de como as características mecânicas e a microestrutura das ZTI são influenciadas por alterações nos métodos de mistura. Foram utilizados MEV e nanoindentação para caracterização, em escala nanométrica, da microestrutura e propriedades mecânicas das ZTI do concreto de agregados reciclados, estimando, indiretamente,



sua porosidade e a concentração de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  e partículas não hidratadas de cimento. Foram produzidos traços pelo NMA e TSMA. O TSMA possibilitou o encapsulamento dos AGR, aumentando a densidade das ZTI, preenchendo vazios e fissuras da antiga pasta de cimento aderida ao agregado reciclado, reduzindo efetivamente o tamanho dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  formados ao redor dos AGR e contribuindo para maior produção de C-S-H, fortalecendo as ZTI e produzindo um concreto com melhor performance mecânica <sup>(33)</sup>.

## 2.6. Análise segundo lentes de pesquisa

A Tabela 5 resume os métodos de mistura utilizados por cada pesquisa abordada, os percentuais de agregados reciclados utilizados, as adições e os respectivos teores utilizados. Do total de artigos do portfólio, oito ensaiaram traços com 100% de AGR, indicando uma tendência das pesquisas em viabilizar o emprego do máximo possível de AGR, procurando minimizar o impacto ambiental do concreto e oferecendo uma alternativa mais sustentável comparada ao uso de agregados virgens.

Tabela 5 - Métodos de mistura, adições e níveis de AGR utilizados nos estudos do portfólio

Autor	Métodos de mistura ensaiados	Percentuais de AGR utilizados na pesquisa	Adição utilizada	Teor de adição
OTSUKI, <i>et al.</i>	NMA, DM	100%	-	-
TAM <i>et al.</i>	NMA, TSMA	10%, 15%, 20%, 25%, 30%	-	-
TAM <i>et al.</i>	NMA, TSMaP1, TSMaP2	10%, 15%, 20%, 25%, 30%	-	-
TAM <i>et al.</i>	NMA, TSMAs, TSMAsc	5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%	SA	2%
LI <i>et al.</i>	NMA, SEPP	100%	SA, CV, EA	10%, 20%
CORINALDESI <i>et al.</i>	TSMA	100%	CV	30%
			AS	15%
KONG <i>et al.</i>	NMA, DM, TM	100%	EA, CV	20%
LI <i>et al.</i>	NMA, TSMA	100%	-	-
ELHAKAM <i>et al.</i>	NMA + cura úmida	25%, 75%	SA	10%
BRAND <i>et al.</i>	TSMA+OD, TSMA+PSSD, TSMA+SSD	100%	CV	20%
RAJHANS <i>et al.</i>	NMA, TSMA, TSMAsfc	20%, 40%, 60%, 100%	SA	2%, 4%, 6%, 7%, 8%
			CV	34,78%
ZHANG <i>et al.</i>	DM, TM, OTM	100,00%	EA	20%

SA – Sílica ativa; EA – Escória de alto forno; CV – Cinzas volantes

Dos 12 estudos abordados, 11 propuseram novos métodos de mistura, modificando aqueles anteriormente expostos na literatura. Os métodos modificados, de maneira geral, contribuíram para aprimorar a trabalhabilidade, resistência mecânica e microestrutura dos concretos de agregados reciclados. A Tabela 6 indica os maiores índices de melhora de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados por método de mistura adotado e concentração de AGR:



**Tabela 6 - Métodos de mistura de concretos de agregados reciclados e maiores ganhos de resistência**

Método de mistura de concreto	% AGR para maiores ganhos	Maiores ganhos de resistência à compressão pelo método abordado, comparando-se a método de mistura convencional	Adições utilizadas para maiores ganhos
DM	100,00%	12,90%	-
TSMA - Tam <i>et al.</i> , (2005)	20,00%	21,19%	-
TSMAp1	25,00%	11,47%	-
TSMAp2	20,00%	19,75%	-
TSMA <sub>s</sub>	25,00%	19,50%	2% SA
TSMA <sub>sc</sub>	25,00%	19,73%	2% SA
<b>SEPP</b>	<b>100,00%</b>	<b>45,40%</b>	<b>10% SA + 10% CV</b>
<b>TM</b>	<b>100,00%</b>	<b>30,75%</b>	<b>20% EA</b>
TSMA - Li <i>et al.</i> , (2012)	100,00%	7,14%	-
Convencional + cura úmida	75,00%	11,63%	-
TSMA - Elhakam <i>et al.</i> , (2012)	75,00%	20,47%	-
<b>Encapsular+ 10% SA</b>	<b>75,00%</b>	<b>37,21%</b>	<b>10% SA</b>
TSMA + OD	100,00%	8,28%	20% CV
TSMA + PSSD	100,00%	6,40%	20% CV
TSMA + SSD	100,00%	2,10%	20% CV
TSMA <sub>sfc</sub>	100,00%	17,61%	7% SA + 34,78% CV
OTM	100,00%	19,00%	20% EA

SA – Sílica ativa; EA – Escória de alto forno; CV – Cinzas volantes

Verifica-se uma tendência dos estudos, a partir da pesquisa de Tam *et al.*, (2008) <sup>(23)</sup>, de utilizar adições pozolânicas combinadas às variações em métodos de mistura. Os métodos de mistura modificados que contam com o uso de adições pozolânicas utilizadas de modo a encapsular os AGR apresentaram os maiores ganhos de resistência à compressão, como destacado na Tabela 6.

A resistência mecânica do concreto é avaliada em todos os artigos, o que pode justificar seu uso como critério de comparação dos resultados dos diferentes métodos de mistura e adições utilizados realizado na Tabela 6. A segunda propriedade mais avaliada é a microestrutura do concreto, podendo indicar a tendência das pesquisas a explorar como a ZTI no concreto de agregados reciclados é modificada por métodos de mistura e uso adições e qual o impacto de tais modificações nas propriedades do concreto. Dos 12 artigos que compõem portfólio, 8 utilizaram adições pozolânicas. As cinzas volantes e sílica ativa foram empregadas em 5 estudos diferentes e a escória de alto forno foi utilizada em três estudos. Conforme exposto na Tabela 6, os maiores ganhos mecânicos foram obtidos para índices de adições de sílica ativa, utilizada de modo a encapsular os AGR. As pesquisas do portfólio, de maneira geral, utilizam adições em níveis de 10 a 20%, quando em substituição ao cimento.



### 3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou um processo de pesquisa acadêmica conduzido por meio do método de revisão sistêmica ProKnow-C. O método tornou possível a obtenção de um portfólio de artigos abrangente, variado e relevante sobre o estado da arte relacionado a métodos de mistura e adições pozolânicas em concretos de agregados graúdos reciclados.

A norma brasileira, NBR 15116 <sup>(37)</sup> que trata do uso de resíduos sólidos da construção civil em aplicações do setor, permite a utilização de agregados reciclados apenas em camadas de pavimentação e em concretos sem função estrutural. Segundo a norma, a viabilização da tecnologia para uso dos agregados reciclados na confecção de concretos estruturais depende de maiores estudos <sup>(37)</sup>. Em países como Austrália, Alemanha, China, Japão, Espanha e Coréia do Sul, o uso dos AGR em concretos com função estrutural é permitido e regularizado por normas específicas <sup>(7)</sup>.

As pesquisas abordadas buscaram propiciar aos concretos de agregados reciclados atingir níveis de trabalhabilidade e resistência mecânica próximos aos do concreto de agregados naturais. Para alcançar tais resultados foram utilizadas diferentes adições pozolânicas e variados métodos de mistura. Não há, até o presente momento, adoção de um método de mistura padronizado para concretos de agregados reciclados. O tema é explorado na comunidade acadêmica e a análise do portfólio indica significativas melhoras às propriedades mecânicas e à durabilidade de concretos de agregados reciclados, em decorrência do emprego de métodos modificados e do uso de adições pozolânicas. O uso de tais métodos e materiais pode proporcionar aos concretos com 100% de AGR atingir até 99,5% da resistência à compressão concretos com 100% de AGN <sup>(19)</sup>. Os resultados positivos decorrentes do uso das técnicas analisadas podem contribuir para viabilizar o uso dos AGR em concretos estruturais, mudando a normatização brasileira.

A utilização de materiais pozolânicos como adição ao concreto de agregados reciclados proporciona melhores resultados quando os agregados são encapsulados pelas adições. As adições, quando utilizadas em substituição parcial do cimento, reduzem seu consumo em traços de concreto e reduzem, conseqüentemente, a quantidade de CO<sub>2</sub> associada ao concreto produzido. A adição de sílica ativa proporcionou os maiores aprimoramentos à resistência à compressão e durabilidade do concreto, fato que pode ter se dado devido à alta área superficial do material. Não foi verificado o uso de cinzas de casca de arroz ou cinzas de bagaço de cana, combinados a métodos de mistura modificados de concretos de agregados reciclados. O estudo do emprego de tais materiais associado a métodos de mistura modificados é uma possibilidade para pesquisas futuras.



## 4. REFERÊNCIAS

1. IPCC. **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel.**
2. OYEDELE, L. O.; AJAYI, S. O.; KADIRI, K. O. **Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement.** Resources, Conservation and Recycling, v. 93, p. 23–31, 2014.
3. WBCSD; IEA. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050.** p. 36, 2009.
4. MEHTA, P. K. **Global Concrete Industry Sustainability.** Concrete international, n. February, p. 45–48, 2009.
5. MARZOUK, M.; AZAB, S. **Resources , Conservation and Recycling Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics.** “Resources, Conservation & Recycling,” v. 82, p. 41–49, 2014.
6. MCNEIL, K.; KANG, T. H. K. **Recycled Concrete Aggregates: A Review.** International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 7, n. 1, p. 61–69, 2013.
7. TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017).** Construction and Building Materials, v. 172, p. 272–292, 2018.
8. BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. **The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 10, p. 1037–1049, 2011.
9. TOPÇU, İLKER B.; GÜNÇAN, N. F. **Using waste concrete as aggregate.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 7, p. 1385–1390, 1995.
10. AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. **Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC.** Cement and Concrete Composites, v. 24, n. 2, p. 269–279, 2002.
11. TOPÇU, İ. B.; ŞENGEL, S. **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 8, p. 1307–1312, Aug. 2004.
12. RAO A. **Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete.,** 2005.
13. LIANG, C. et al. **The damping property of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 102, p. 834–842, 2016.
14. QI, B. et al. **Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting–drying cycles and flexural loading.** Construction and Building Materials, v. 174, p. 130–137, 2018.
15. SHI, C. et al. **Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 466–472, 2016.
16. AL-BAYATI, H. K. A. et al. **Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, v. 112, p. 284–298, 2016.
17. BEHERA, M. et al. **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review.** Construction and



Building Materials, v. 68, p. 501–516, 2014.

18. ABD ELHAKAM, A.; MOHAMED, A. E.; AWAD, E. **Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete.** Construction and Building Materials, v. 35, p. 421–427, 2012.

19. KONG, D. et al. **Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010.

20. LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. **Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009.

21. TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.** Cement and Concrete Research, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

22. TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Environmental enhancement through use of recycled aggregate concrete in a two-stage mixing approach.** HUMAN AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT, v. 12, n. 2, p. 277–288, 2006.

23. TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. **Diversifying two-stage mixing approach (TSMa) for recycled aggregate concrete: TSMa and TSMAsc.** Construction and Building Materials, v. 22, n. 10, p. 2068–2077, 2008.

24. ZHANG, W. et al. **Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete.** v. 203, p. 601–607, 2019.

25. KAUARK, F. DA S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da Pesquisa - um guia prático.** Itabuna: Via Litterarum, 2010.

26. FONSECA, J. J. S. DA. **Metodologia da pesquisa científica.** São Carlos: Serviço de Biblioteca e Informação ..., p. 1–127, 2002.

27. PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

28. VILELA, L. O. **Aplicação Do Proknow-C Para Seleção De Um Portifólio Bibliográfico E Análise Bibliométrica Sobre Avaliação De Desempenho Da Gestão Do Conhecimento.** Revista Gestão Industrial, v. 8, n. 1, p. 76–92, 2012.

29. CAPES. **Plataforma Sucupira. Periódicos Qualis. Classificação Periódicos Quadriênio 2013-2016.** Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>>. Acesso em: 23 may. 2019.

30. OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.-I.; YODSUDJAI, W. **Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 15, n. 5, p. 443–451, 2003.

31. TAM, V. W.-Y.; GAO, X.-F.; TAM, C. M. **Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete.** Magazine of Concrete Research, v. 58, n. 7, p. 477–484, 2006.

32. CORINALDESI, V.; MORICONI, G. **Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, n. 8, p. 2869–2876,



2009.

33. LI, W. et al. **Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches**. Construction and Building Materials, v. 35, p. 1045–1055, 2012.
34. BRAND, A. S.; ROESLER, J. R.; SALAS, A. **Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete**. Construction and Building Materials, v. 79, p. 83–89, 2015.
35. RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. **Sustainable self compacting concrete from CD waste by improving the microstructures of concrete ITZ**. Construction and Building Materials, v. 163, p. 557–570, 2018.
36. ZHANG, W. et al. **Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete**. Construction and Building Materials, v. 203, p. 601–607, 2019.
37. ABNT. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural** -. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.



## **RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: APLICAÇÃO DOS INDICADORES DA NBR ISO 37120 – DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL EM COMUNIDADES PARA A CIDADE DE CUIABÁ-MT**

**Marcelo Martins da Cruz Neto (1); Ivan Julio Apolonio Callejas (2); Emeli Lalesca Aparecida da Guarda (3); Luciane Cleonice Durante (4).**

(1) Universidade Federal de Mato Grosso – marcelo\_martins1234@hotmail.com I; (2) Universidade Federal de Mato Grosso – ivancallejas1973@gmail.com; (3) Universidade Federal de Santa Catarina – emeliguarda@gmail.com; (4) Universidade Federal de Mato Grosso - luciane.durante@hotmail.com

### **RESUMO**

Os indicadores de desenvolvimento sustentável são ferramentas essenciais para o planejamento e gestão urbana. Dentre as problemáticas enfrentadas pelos gestores municipais, a destinação de resíduos sólidos mostra-se relevante, visto que este fator impacta diretamente na qualidade de vida da população. Diante disso, este trabalho tem como objetivo aplicar a seção de resíduos sólidos da NBR ISO 37120 – Desenvolvimento Sustentável em Comunidades para o município de Cuiabá - Mato Grosso e, além disso, realizar a comparação com o município de León, no México. Os procedimentos metodológicos consistem na aplicação dos dados obtidos por meio de visitas técnicas, envio de ofícios e consultas aos órgãos responsáveis, em equações apresentadas pela seção de resíduos sólidos da norma para o cálculo dos indicadores. Os resultados mostraram que dispõe 100% do seu lixo em aterros sanitários e não descartam resíduos em lixões, usinas de incineração e outros meios, enquanto León dispõe 97,5% do seu lixo em aterros e 2,5% em outros meios. Ademais, constatou-se que ambos os municípios não possuem disponibilidade de dados sobre descarte e reciclagem de resíduos perigosos. Assim, enfatiza-se a necessidade da realização da consolidação dos dados pela gestão municipal e consequente aplicação dos indicadores da norma para o município.

**Palavras-chave:** NBR ISO 37120, desenvolvimento sustentável, resíduos sólidos.

## **URBAN SOLID WASTE: APPLICATION OF THE INDICATORS OF NBR ISO 37120 - SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN COMMUNITIES FOR THE CITY OF CUIABA-MT**

### **ABSTRACT**

Sustainable development indicators are essential tools for urban planning and management. Among the problems faced by municipal managers, the disposal of solid waste is relevant, as this factor directly impacts the quality of life of the population. Therefore, this work aims to apply the solid waste section of NBR ISO 37120 - Sustainable Development in Communities for the municipality of Cuiabá - Mato Grosso and, in addition, make the comparison with the municipality of León, in México. The methodological procedures consist in the application of the data obtained through technical visits, sending letters and consultations to the responsible agencies, in equations presented by the solid waste section of the standard for the calculation of the indicators. The results showed that it disposes of 100% of its waste in landfills and does not dispose of waste in dumps, incineration plants and other means, while Leon disposes of 97.5% of its waste in landfills and 2.5% in other means. Furthermore, it was found that both municipalities do not have data on hazardous waste disposal and recycling. Thus, the need for data consolidation by the municipal management is emphasized and consequent application of the norm indicators for the municipality

**Key-words:** NBR ISO 37120, sustainable development, solid waste.



## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico mundial teve seu início após as revoluções industriais, com o advento das máquinas e tecnologias. Entretanto, tal crescimento desenfreado, com o passar dos anos, acarretou em degradação ambiental e desigualdade social. Sendo assim, no final do século XX, a preocupação com o esgotamento de recursos e com a qualidade de vida da população, deu início a grandes conferências que tratavam o recente termo criado, o desenvolvimento sustentável.

A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações (WWF,2019). Segundo WWF (2019), essa definição surgiu na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1983.

Já em 1992, no Rio de Janeiro, uma importante Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento foi realizada, a Rio-92. Esta conferência deixou como legado a Agenda 21 Global, que estabeleceu diretrizes a serem seguidas pelos 179 países que acordaram e assinaram esse documento.

Entre uma das diretrizes a serem seguidas pelo documento, tem-se a utilização de indicadores para estabelecer o desenvolvimento sustentável. É preciso desenvolver indicadores do desenvolvimento sustentável que sirvam de base sólida para a tomada de decisões em todos os níveis e que contribuam para uma sustentabilidade auto-regulada dos sistemas integrados de meio ambiente e desenvolvimento (AGENDA 21, 1995).

Além disso, em seu capítulo 28, a Agenda 21 (1995) recomenda que, como muitos dos problemas e soluções tratados no documento tem raízes em atividades locais, a participação e cooperação das autoridades locais será um fator determinante na realização de seus objetivos.

Diante disso, muitos métodos de análise do desenvolvimento sustentável surgiram para tentar atender as diretrizes estabelecidas pela Agenda 21. No entanto, devido a essa diversidade, não houve uma padronização metodológica, mas sim diversos métodos aplicados isoladamente e em diversos países.

Assim, para suprir a necessidade de tal padronização, em 2014, a Organização Internacional de Normalização publicou a ISO 37120, que estabeleceu 100 indicadores de desenvolvimento sustentável que deveriam ser aplicados em municípios para futura comparação e compartilhamento de boas práticas. Já em 2017, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publica a NBR ISO



37120:2017 adaptando para o Brasil os indicadores da ISO 37120 pois, conforme ABNT (2017), cidades necessitam de indicadores para mensurar seu desempenho, uma vez que os indicadores existentes geralmente não são padronizados, consistentes ou comparáveis no tempo ou entre cidades.

Entre as 17 temáticas apresentadas pela norma, a que aborda os indicadores de resíduos sólidos se mostra relevantes, uma vez que influencia diretamente na qualidade de vida da população e na gestão ambiental. O descarte apropriado, transporte e tratamento dos resíduos sólidos são alguns dos elementos mais importantes da gestão de uma cidade e uma das primeiras áreas na qual governo e instituições deveriam focar (ABNT, 2017).

Segundo ABNT (2017), os resíduos sólidos são os materiais sólidos não solúveis que são descartados, além disso, inclui na definição a lama de depuração, lixo municipal, resíduos industriais, agrícolas, de mineração e de demolição.

Ao se analisar processo de transformação urbana sofrido pela cidade de Cuiabá, Capital do Estado de Mato Grosso, percebe-se que o mesmo se iniciou na década de 1930, intensificou-se durante a década de 1960, tornando-a um dos principais centros de abastecimento para as áreas de alta produtividade agrícola da região do Cerrado e do sul da Amazônia. Em 1970, a população de Cuiabá era de 88.254 habitantes e em 2010 alcançou 551.350, um aumento de mais de 624% (IBGE, 2010). Esse intenso crescimento e concentração populacional favoreceu o processo acelerado de mudanças ambientais, em função das alterações nas coberturas das superfícies do solo, e também acarretou em maior produção de lixo tornando a gestão dos resíduos sólidos uma problemática relevante, visto que influencia diretamente na qualidade de vida da população.

## **1.1. Objetivo**

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo aplicar a seção de resíduos sólidos da norma NBR ISO 37120:2017 para o município de Cuiabá no estado de Mato Grosso e, além disso, realizar a comparação com o município de León, no México, uma vez que este tem seus dados divulgados na plataforma oficial da ISO 37120:2014, a World Concill on City Data, o Conselho Mundial de dados das Cidades. Ademais, este artigo objetiva relatar as dificuldades encontradas na disponibilização de dados.



## 2. MÉTODO

Diante da necessidade de analisar a gestão dos resíduos sólidos, este trabalho apresenta o cálculo dos indicadores de resíduos sólidos para a cidade de Cuiabá-MT. Assim, utilizando como base de cálculo a seção da NBR ISO 37120 que trata de resíduos sólidos, aplica-se os dados do município de Cuiabá nas equações conforme apresentado na Tabela 1.

A tabela abaixo, apresenta os cálculos metodológicos realizados para o cálculo dos indicadores da seção de resíduos sólidos.

Tabela 1 - Relação de Indicadores de Resíduos Sólidos da NBR ISO 37120 e suas equações

Resíduos Sólidos		
Indicadores Essenciais		
1. Porcentagem da população urbana com coleta regular de resíduos sólidos (domiciliar)	$\frac{\text{n}^\circ \text{ de pessoas servidas com coleta de resíduos sólidos}}{\text{população total da cidade}} \times 100$	(A)
2. Total de coleta de resíduos sólidos municipais per capita	$\frac{\Sigma \text{ quantidade de resíduos sólidos gerado em toneladas}}{\text{População total da cidade}}$	(B)
3. Porcentagem de resíduos sólidos que são reciclados	$\frac{\text{Quantidade de resíduos sólidos reciclados}}{\text{Quantidade de resíduos sólidos produzidos na cidade}} \times 100$	(C)
Indicadores de apoio		
4. Porcentagem de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários	$\frac{\text{Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário}}{\text{Quantidade de resíduos sólidos produzidos na cidade}} \times 100$	(D)



5. Porcentagem de resíduos sólidos urbanos descartados para incineração	$\frac{\text{Quantidade de resíduos sólidos destinados para incineração}}{\text{Quantidade de resíduos sólidos produzidos na cidade}} \times 100$	(E)
6. Porcentagem de resíduos sólidos urbanos queimados a céu aberto	$\frac{\text{Quantidade de resíduos sólidos que são queimados a céu aberto}}{\text{Quantidade total de resíduos sólidos produzidos na cidade}} \times 100$	(F)
7. Porcentagem de resíduos sólidos urbanos dispostos em lixões a céu aberto	$\frac{\text{Quantidade de resíduos sólidos que são dispostos em lixão}}{\text{Quantidade total de resíduos sólidos produzidos na cidade}} \times 100$	(G)
8. Porcentagem de resíduos sólidos urbanos dispostos por outros meios	$\frac{\text{Quantidade de resíduos sólidos que são dispostas em outros meios}}{\text{Quantidade total de resíduos sólidos produzidos na cidade}} \times 100$	(H)
9. Geração de resíduos perigosos per capita (toneladas)	$\frac{\text{Quantidade total anual de resíduos perigosos}}{\text{População total da cidade}} \times 100$	(I)
10. Porcentagem de resíduos urbanos perigosos que são reciclados	$\frac{\text{Quantidade de resíduos perigosos que são reciclados}}{\text{Quantidade total de resíduos perigosos que é gerada}} \times 100$	(J)

Fonte – Adaptado de Couto (2017).

Os dados necessários para aplicação nas equações matemáticas apresentadas pela norma, foram solicitados por meio de envio de ofícios aos órgãos responsáveis pela gestão de resíduos sólidos no município. Além disso, foi feita a busca em bancos de dados nacionais que registram informações referentes ao saneamento básico.

Para a realização da comparação, primeiro realizou-se uma busca por cidades da América Latina que tivessem seus indicadores da ISO 37120 publicados, que possuíssem Índice de Desenvolvimento dentro da mesma faixa que o município de Cuiabá pois, conforme PNUD, Ipea e



FJP (2014), no IDH Global do Relatório de Desenvolvimento Humano de 2014, as faixas de desenvolvimento humano são fixas, sendo “Alto Desenvolvimento Humano” as cidades que possuem IDH entre 0,700 e 0,799. Além disso, atentou-se para a proximidade dos quantitativos populacionais. Dessa forma, foi escolhida a cidade de León, no México, para a comparação de indicadores.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Cálculo dos indicadores

De acordo com o procedimento metodológico, os dados do município de Cuiabá foram em parte disponibilizados por meio de visita técnica a Secretaria Municipal de Serviços Urbanos (SMSU) e também por meio do banco de dados da Série Histórica do Serviço Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).’

Tabela 2 - Relação de Indicadores de Resíduos Sólidos da NBR ISO 37120 e suas equações

Dados Coletados		Fonte
População atendida pela coleta de resíduos	574.444 hab.	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
Quantidade de resíduos reciclados	2643,738 ton/ano	Secretaria Municipal de Serviços Urbanos
Quantidade total de resíduos urbanos gerados no município	162.677,643 ton/ano	Secretaria Municipal de Serviços Urbanos
Quantidade de resíduos dispostos em aterros sanitários	162.677,643 ton/ano	Secretaria Municipal de Serviços Urbanos
Quantidade de resíduos descartados para incineração	0 ton/ano	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
Quantidade de resíduos queimados a céu aberto	0 ton/ano	Secretaria Municipal de Serviços Urbanos
Quantidade de resíduos dispostos em lixões	0 ton/ano	Secretaria Municipal de Serviços Urbanos
Quantidade de resíduos dispostos em outros meios	0 ton/ano	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento



População estimada no ano de referência	590.118 hab.	IBGE
Quantidade total anual de resíduos perigosos	-	Dado não disponibilizado pelo órgão responsável
Quantidade total anual de resíduos perigosos que são reciclados	-	Dado não disponibilizado pelo órgão responsável

### 3.2 Interpretação e comparação

Conforme calculado anteriormente, tem-se disposto na Figura 2 a relação dos indicadores para o município de Cuiabá e para município de León, no México, conforme obtido em WCCD (2019). Os dados para o município de Cuiabá são referentes ao ano de 2017, enquanto os dados de León, 2015.

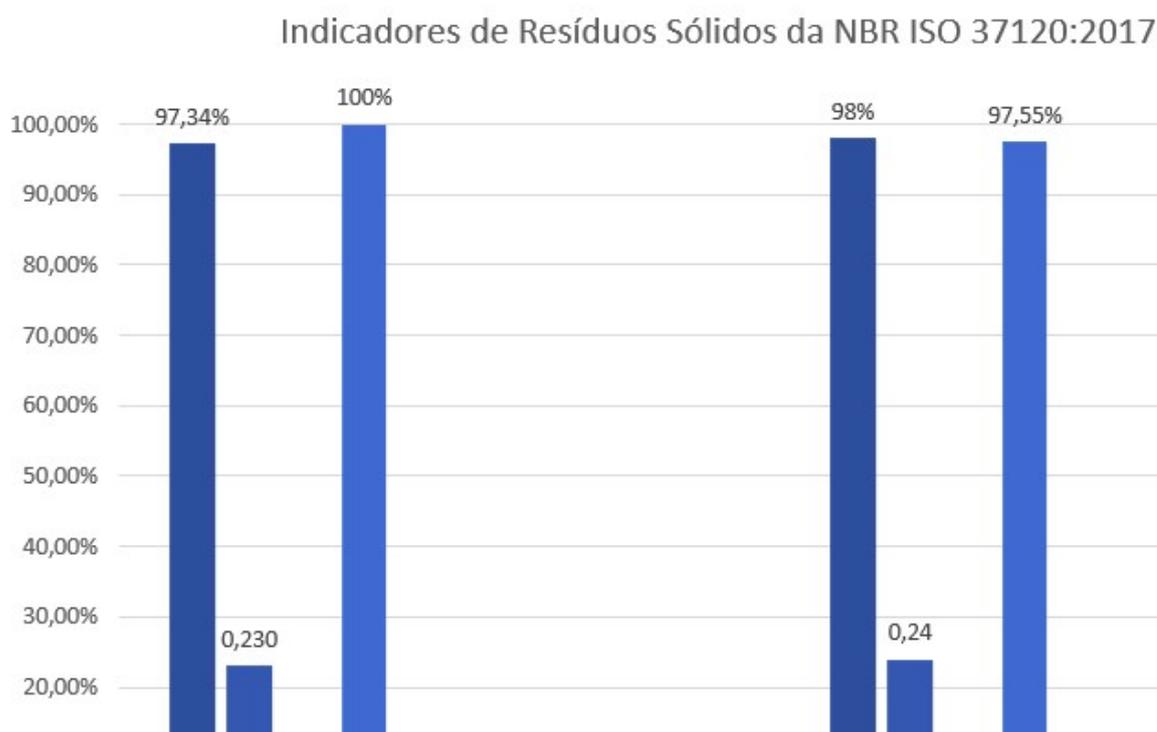


Figura 1 – Comparação entre os municípios de Cuiabá e León

Por meio da comparação, é possível extrair informações que possam caracterizar a eficiência da gestão de resíduos sólidos. Apesar de se tratarem de municípios completamente diferentes em relação ao seu perfil ambiental e cultural, comparar a cidade de Cuiabá com León auxilia na análise das possíveis melhoras tanto na gestão de resíduos quanto na disponibilidade de dados.



É fato que a porcentagem da população urbana com coleta regular de resíduos aponta a eficiência da gestão pública no atendimento à população quanto à coleta de resíduos sólidos urbanos. Segundo ABNT (2017), os sistemas de resíduos sólidos contribuem de muitas maneiras para a saúde da população, para a economia local, o meio ambiente e também auxilia na compreensão social e educação. Nesse sentido, é notável que ambas as cidades se assemelham por atingir quase a totalidade da população com a coleta domiciliar,

O segundo indicador trata da quantidade total de resíduos per capita nos municípios e revela que ambos os municípios possuem quantidades próximas de resíduos per capita. Entretanto, ao analisar o indicador que refere-se a porcentagem de resíduos reciclados, constata-se que a capital mato-grossense tem maior quantidade de resíduos destinados para reaproveitamento enquanto León no México, detentor de praticamente a mesma quantidade de resíduos sólidos per capita, não possui reciclagem de resíduos sólidos, dado este que mostra a deficiência do serviço público da cidade em gerir os resíduos.

Em seguida, o indicador que trata dos aterros sanitários afirma que no município de Cuiabá 100% dos resíduos são destinados para aterros sanitários, enquanto em León, 97,5% dos resíduos são destinados aos aterros. É notável que ambos municípios tem porcentagens bem altas quanto ao depósito em aterros sanitários. Este dado é de extrema importância, pois, segundo ABNT (2017), um sistema adequado de resíduos sólidos pode fomentar práticas de reciclagem para maximizar a vida útil dos aterros sanitários e criar uma microeconomia, além de proporcionar fontes alternativas de energia.

Analisando os dados obtidos, constata-se que em nenhum dos municípios há a queima de resíduos por incineração. Conforme ABNT (2017), isso ocorre devido ao fato de que a incineração é recorrente em cidades que geram mais resíduos sólidos do que podem dispor.

Os indicadores de resíduos sólidos mas sim por empresas privadas. Foi solicitado por meio de e-mail e telefonemas a disponibilização dos dados referentes ao volume de resíduos perigosos e a quantidade que é reciclada, porém alguns pedidos foram recusados por confidencialidade e outros não foram respondidos.

Resíduos sólidos perigosos devem referir-se a qualquer substância destinada à eliminação, que seja prejudicial para as pessoas, plantas, animais ou ambiente (ABNT, 2017). Ambos os municípios não possuem dados disponíveis que tratem da gestão dos resíduos perigosos, seja referente ao seu



quantitativo ou à sua reciclagem, tal fator é preocupante e demonstra a não transparência da gestão pública com a destinação desses resíduos prejudiciais à saúde pública.

#### 4. CONCLUSÃO

Diante do exposto, é possível concluir que o município de Cuiabá, apesar de não disponibilizar dados acerca de todos os indicadores exigidos, pela NBR ISO 37120, mostrou certa eficiência na gestão de resíduos, uma vez que atende quase a totalidade da população e não dispõe seus resíduos em lixões a céu aberto e muito menos os incinera, assim como o município objeto de comparação.

É importante ressaltar que a norma utilizada para este trabalho não estabelece metas ou valores a serem atingidos pelos municípios, a norma sugere que os gestores divulguem seus dados e certifiquem seus municípios com o objetivo de que as cidades compartilhem boas práticas e realizem comparação dos seus próprios dados com o passar dos anos.

Dessa forma, a comparação possibilitou a conclusão de que o município de Cuiabá está a frente de León na questão da reciclagem de resíduos sólidos urbanos. Além disso, ao se analisar os indicadores, constata-se que há a predominância de destinação do lixo à aterros sanitários em ambos os municípios.

Sendo assim, propõe-se como ferramenta de gestão pública, a realização de estudos para construção de dados pela Prefeitura de Cuiabá. É imprescindível a utilização da Norma pela administração para divulgação de dados do município e futura inclusão em uma rede de cidades que divulgam seus indicadores e compartilham as boas práticas objetivando de adequar a gestão municipal com o desenvolvimento sustentável.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JAGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento.** Brasília: Câmara dos Deputados, 1995.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 37120:** Desenvolvimento sustentável de comunidades – Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
3. COUTO, E. A. **Aplicação dos indicadores de desenvolvimento sustentável da norma NBR 37120:2017 para a cidade do Rio de Janeiro e análise comparativa com cidades da América**



- latina.** 2018. 185 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
4. FERREIRA, H. F. Diagnóstico da geração e destinação de embalagens de Polietileno Tereftalato (PET), direcionadas à atual área de disposição final de resíduos sólidos de Várzea Grande, Mato Grosso. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Cuiabá, 2015.
  5. IBGE. **Instituto Brasileiro de Pesquisas Geográficas.** Estimativas Populacionais 2010. IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Disponível em: < [http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)>. Acesso em: 09 mai. 19.
  6. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos.** Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos.html>>. Acesso em: 09 mai. 19.
  7. PNUD; IPEA; FJP. **Atlas do Desenvolvimento Humano nas Regiões Metropolitanas Brasileiras.** 120 p., Brasília, 2014.
  8. WCCD - WORLD CONCIL ON CITY DATA. Compare Cities Worldwide,. Disponível em: < <https://www.dataforcities.org/> >. Acesso em: 26 ago. 2019.
  9. WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF) - BRASIL. **O que é desenvolvimento sustentável?** Disponível em: < [https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/questoes\\_ambientais/desenvolvimento\\_sustentavel/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/)>. Acesso em: 25 ago. 2018.



# AValiação DA VIABILIDADE DO USO DE AREIA DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM DOSAGENS DE SOLO-CIMENTO AUTOADENSÁVEL

**Souza, B.G (1); Callejas, I.J.A (2); Simione, F.C (3); Durante. L.C (4)**

(1) UFMT- Universidade Federal de Mato Grosso – bruna-guima@outlook.com; (2); UFMT- Universidade Federal de Mato Grosso – ivancallejas1973@gmail.com.com (3) UFMT- Universidade Federal de Mato Grosso - fernandacavattiarq@gmail (4) UFMT- Universidade Federal de Mato Grosso – luciane.durante@hotmail.com

## RESUMO

A reciclagem de Resíduos da Construção Civil é uma alternativa para minimizar o impacto ambiental, uma vez que se promove a conservação de matérias-primas não renováveis e minimizam-se o volume de resíduos dispostos em aterros e áreas irregulares. Este trabalho objetivou caracterizar misturas preliminares de solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduo da construção civil, buscando atender aos critérios mínimos de desempenho estabelecidos nas normas brasileiras. Seguiram-se as seguintes etapas metodológicas: (a) caracterização dos materiais utilizados nas misturas (solo e RCC); (b) desenvolvimento preliminar de três dosagens com teores de 0%, 50%, e 100% a fim de identificar o percentual ideal de incorporação de RCC nas misturas; e, (c) realização de ensaios de caracterização físicas e mecânicas no estado fresco (espalhamento) e endurecido (absorção de água e resistência à compressão simples). O espalhamento das misturas variou entre 430mm a 765mm, enquanto a absorção de água foi inferior a 20% na mistura com 100% de incorporação de RCC. Constatou-se que o teor ideal de incorporação do RCC está na faixa de 50% a 100%. Concluiu-se que a incorporação de RCC em misturas de solo cimento autoadensável apresenta potencial para a produção de paredes de vedação. Sugere-se complementação do estudo, visto que ainda há a necessidade de se testar outras porcentagens de substituição.

**Palavras-chave:** solo, resíduo de construção, solo-cimento autoadensável.

## FEASIBILITY EVALUATION OF THE USE OF SAND CONSTRUCTION RESIDUE IN MIXTURES OF SELF-COMPACTING SOIL-CEMENT

### ABSTRACT

Recycling Construction Waste (RCW) is an alternative to minimize environmental impact, since it promotes the conservation of non-renewable raw materials and the volume of waste disposed in landfills and irregular areas is minimized. This work objectified to characterize physically and mechanically mixtures of self-compacting soil-cement with the incorporation of construction residue, following the minimum performance criteria established in the Brazilian standards. The following methodological steps were followed: (a) characterization of the materials used in the mixtures (soil an RCW); (b) preliminary development of three dosages with 0%, 50% e 100% in order to identify the ideal percentage of incorporation of RCW in mixtures; and (c) conduction of physical characterization tests in the fresh state (slump flow) and hardened (water absorption and compressive strength). The slump flow of the mixtures varied from 430 to 765mm, while the water absorption was less than 20% in the blend with 100% incorporation of RCW. It has been found that ideal content of RCW incorporation is in the range of 50% to 100%. It was concluded that the incorporation of RCW self-compacting soil-cement in mixtures has potential for the production of vertical panels. It is suggested to complement the study, since there is still a need to test other substitution percentages.

**Key-words:** soil, waste construction, soil-cement self compacting.



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da Construção Civil além de consumir grandes quantidades de recursos não renováveis, utiliza energia de forma intensiva, emite grande quantidade de poluentes e caracteriza-se como o principal setor gerador de resíduos do mundo (PACHECO-TORGAL E LABRINCHA, 2013)<sup>(1)</sup>.

A reciclagem desses resíduos é uma oportunidade de transformar despesas numa fonte de faturamento, ou pelo menos, reduzir as despesas com deposições irregulares e volumes de extração de matérias-primas (FREITAS, 2009)<sup>(2)</sup>.

A utilização do solo estabilizado com cimento ou cal, assim como a reutilização de resíduos provenientes da construção civil, vem sendo amplamente pesquisados na área de materiais e técnicas construtivas como alternativas aos tradicionais insumos utilizados na construção civil. A maioria destas pesquisas são voltadas para a confecção de tijolos ou blocos, por meio de técnicas de prensagem ou compactação do material, para fins de vedação (BARBOZA, 2014)<sup>(3)</sup>.

Por outro lado, existe a possibilidade da utilização do solo-cimento no estado plástico, com consistência parecida com a da argamassa, ou ainda, a sua utilização de forma semelhante ao concreto autoadensável. Este material recebe o nome de solo-cimento autoadensável (SCAA) e devido ao seu estado plástico, permite maior rapidez na produção e aplicação, já que seu adensamento ocorre por meio do seu peso próprio (SEGANTINI, 2000)<sup>(4)</sup>.

Desta forma, diante da necessidade de minimizar os impactos ambientais causados pelo setor da construção civil, busca-se estudar a potencialidade da utilização tanto de resíduos de solos oriundos do processo de escavação, que usualmente são dispostos em aterros ou em área ilegais, como de resíduos de areia de construção civil beneficiada em usinas de triagem.

Diante deste cenário, objetiva-se caracterizar física e mecanicamente misturas de solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduo da construção civil. Focou-se nas misturas preliminares de SCAA visando entender a interação e comportamento entre o solo, o RCC e o aditivo superplastificante.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Solo

O solo utilizado nessa pesquisa foi retirado de um depósito localizado na área da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), proveniente de escavações realizadas no perímetro da universidade (Figura 1).

Figura 1 - Depósito de solo proveniente de escavação



Fonte: Próprio autor

Para caracterização do solo, realizou-se o ensaios indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Normas para caracterização do solo

Norma utilizada	Ensaio
NBR NM 6457 (ABNT, 2016) <sup>(5)</sup>	Ensaio de caracterização
NBR 52 (ABNT, 2009) <sup>(6)</sup>	Determinação da massa específica e massa específica aparente
NBR NM 7181 (ABNT, 2016) <sup>(7)</sup>	Análise Granulométrica
NBR NM 6459 (ABNT, 2017) <sup>(8)</sup>	Determinação do limite de liquidez
NBR NM 7180 (ABNT, 2017) <sup>(9)</sup>	Determinação do limite de plasticidade

Fonte: Próprio autor



### 3.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi CP II E 32, da marca Itaú, fabricado pela Votorantim. Esse cimento é o mais utilizado e encontrado no município de Cuiabá. Trata-se de um cimento composto, com adição de pozolana que pode ser utilizado em todas as fases da construção. É um produto regulamentado pela NBR 16697 (ABNT, 2018) <sup>(10)</sup>.

### 3.1.3 Resíduo de Construção Civil

Os resíduos de areia reciclado foram obtidos na Usina de Reciclagem Eco Ambiental localizada no Município de Cuiabá – MT.

Para a utilização desse material foram realizados ensaios de caracterização, a fim de se atestar a potencialidade de utilização do material como agregado miúdo, nas dosagens do solo cimento autoadensável (Tabela 2).

**Tabela 2 - Normas para caracterização do RCC**

<b>Norma utilizada</b>	<b>Ensaio</b>
NBR NM 26 (ABNT, 2009) <sup>(11)</sup>	Amostragem
NBR NM 27 (ABNT, 2000) <sup>(12)</sup>	Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório
NBR NM 52 (ABNT, 2009) <sup>(13)</sup>	Massa específica e massa específica aparente
NBR NM 248 (ABNT, 2003) <sup>(14)</sup>	Granulometria
NBR NM 30 (ABNT, 2001) <sup>(15)</sup>	Absorção de Água

Fonte: Próprio autor

### 3.1.4 Aditivo

Utilizou-se o aditivo Sika ViscoCrete 5700, o qual tem sua composição química a base de policarboxilatos. É considerado um aditivo de 3ª geração (Tabela 3). Apresenta pega normal, sendo usualmente utilizado em concretos com alta resistência inicial, concreto de alto desempenho e concreto autoadensável.



**Tabela 3 - Composição do superplastificante**

<b>Dados Técnicos do Aditivo Sika ViscoCrete 5700</b>	
Base Química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto	Líquido Castanho
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,07 kg ± 0,02 kg/litro
PH	45, ± 1,0
Dosagem Recomendada	0,30 a 1,5% sobre o peso de aglomerantes

Fonte: Sika (2018)

### 3.1.5 Água

A água utilizada no desenvolvimento da pesquisa foi da rede de abastecimento urbano, realizado pela empresa Águas Cuiabá.

## 3.2 Método

A fim de se determinar a potencialidade da incorporação da areia de RCC nas misturas de solo cimento auto adensável, a pesquisa foi dividida em três etapas:

- a) Etapa 1: caracterização de todos os materiais a serem utilizados no desenvolvimento da pesquisa;
- b) Etapa 2: dosagem preliminar das misturas, bem como os teores de aditivo e a água.
- c) Etapa 3: realizaram-se ensaios para caracterização das misturas no estado fresco e no estado endurecido.

Detalham-se a seguir, as etapas acima relacionadas.

### 3.2.1 Definição das características de desempenho das misturas

A partir da revisão literatura sobre o tema e com base nos critérios de aceitabilidade presente na norma técnica de paredes monolíticas de solo-cimento convencional, utilizada em virtude da ausência de normativas sobre o solo-cimento autoadensável, e, complementarmente, na norma NBR 15823 (ABNT, 2017)<sup>(16)</sup> de concreto autoadensável, que estabelece requisitos de classes de



espalhamento (índice de estabilidade visual), definiu-se os requisitos físicos e mecânicos de desempenho e aceitabilidade para as dosagens conforme Tabela 4.

**Tabela 4 - Requisitos aplicados à mistura de referência de SCAA e aos demais visando a aplica em paredes monolíticas**

Norma	Resistencia à compressão	Espalhamento requerido	Absorção de água
<b>Critério de Desempenho</b>	≥ 1,0 MPA	660 – 750mm	≤ 20%

Fonte: Próprio autor

### 3.2.2 Definição das Composições das Misturas

A composição do traço de referência foi definida por meio de revisão sistemática da literatura sobre o tema. Como a pesquisa tem enfoque na produção de paredes monolíticas com baixa incorporação de energia, definiu-se para mistura de solo-cimento autoadensável de referência o menor teor de porcentagem de utilização de cimento, ou seja, 20% em massa dos materiais secos, seguindo com as porcentagens encontradas na revisão de literatura entre 20% a 30% em massa de materiais secos (BERTÉ e ALCANTARA, 2013<sup>(17)</sup>; MARTINS, 2014<sup>(18)</sup>; CLAVERIE, 2015<sup>(19)</sup>; MILANI e BARBOZA, 2016<sup>(20)</sup>; FERNANDES, 2017<sup>(21)</sup>; SOUZA, PAZ e MILANI, 2016<sup>(22)</sup>; LLAJARUNA, 2017<sup>(23)</sup>). A proporção entre cimento/solo foi estabelecida em 1:5, em virtude de esta apresentar, de acordo com a bibliografia, resistência mecânica compatível com critério de desempenho estabelecido na Tabela 4.

Para estudar a influência da areia de RCC na mistura, a incorporação deste material foi realizada substituindo o solo da mistura de referência em intervalos de 50% e 100% de substituição em massa, mantendo-se constante o valor do aditivo nas misturas conforme indicado na Tabela 5. Desta forma, com a mistura denominada T1 apresenta 100% de massa de solo, a mistura T2 que apresenta 50% de areia de RCC e 50% de solo e a mistura T3 que apresenta 100% de RCC.

Como o aditivo permaneceu constante nas misturas, houve a necessidade de se variar a quantidade de água nas misturas visando alcançar o intervalo de espalhamento indicado na Tabela 4. O estudo de pré-dosagem indicou que na mistura com 100% areia de RCC foi necessário utilizar menos água para alcançar a fluidez almejada, enquanto aquela composta por 100% de solo-cimento necessitava de maior quantidade de água entre as misturas, em virtude da quantidade de finos presente no solo. Desta forma, diante do comportamento observado, à medida que se incorporou o RCC na mistura,



foi-se progressivamente reduzindo a relação água/cimento, o que influenciará diretamente os resultados de resistência à compressão (Tabela 5).

**Tabela 5 - Definição das dosagens de solo-cimento auto adensável e com incorporação de areia reciclada de RCC.**

Mistura	Traço	Solo	Cimento	Água	Aditivo	RCC	Relação a/c
T1	1:5	1000	200	500	3,2	-	2,5
T2	1:5	500	200	400	3,2	500	2,0
T3	1:5	-	200	300	3,2	1000	1,5

Fonte: Próprio autor

A caracterização física e mecânica foi conduzida por meio dos ensaios indicados na Tabela 6, sendo necessário confeccionar 6 corpos de prova para cada mistura, totalizando 18 corpos de prova com dimensões de 100x200mm. Foi seguindo os seguintes procedimentos para obtenção das misturas:

a) Primeiramente foram colocados os materiais secos: solo, cimento, resíduos, e efetuada em seguida a sua homogeneização. Utilizou-se como recipiente para a confecção das misturas, um carrinho de mão.

b) Posteriormente, adicionou-se um terço da quantidade de água definida em cada traço, homogeneizando a massa durante 2 minutos;

c) Depois, foi adicionado ao segundo terço de água o aditivo, e misturado a massa por mais 3 minutos antes de colocar o terço final da água, o qual foi homogeneizada por mais 2 minutos.

d) Para cada ensaio realizado no estado fresco, a mistura era depositada de volta no recipiente para que fosse misturada, antes do preenchimento dos corpos de prova.



**Figura 2 – Mistura dos materiais secos**



Fonte: Próprio autor

**Figura 3 - Consistência da mistura com 100% solo**



Fonte: Próprio autor

**Tabela 6 - Ensaios de caracterização das misturas**

	<b>Normas utilizadas</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Nº CP</b>	<b>Idade do ensaio</b>
<b>Estado Fresco</b>	NBR 15823-2 (ABNT, 2017)	Espalhamento	-	Após mistura
<b>Estado Endurecido</b>	NBR 12025 (ABNT, 2012).	Resistência á compressão	3	7 dias
	NBR 13555 (ABNT, 2012)	Absorção de água	3	7 dias

Fonte: Próprio autor

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

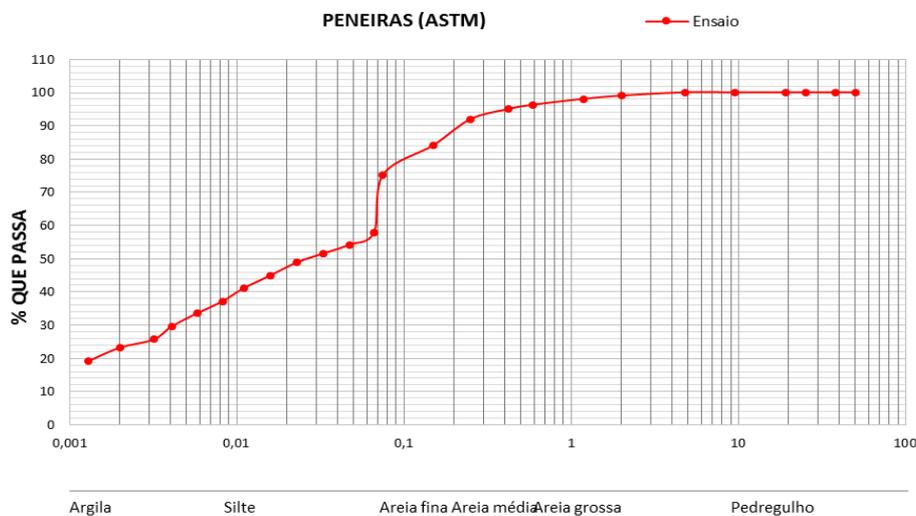
### **4.1 Caracterização do solo e da areia reciclada de RCC**

#### **4.1.1 Solo**

O solo utilizado foi o Latossolo Vermelho Amarelo, caracterizado como areno-siltoso. Nota-se que o solo apresenta 100% de material passando na peneira com abertura de malha de 4,75mm, 53,2% de teor de finos passantes na peneira com abertura de malha de 75µm (o ideal seria entre 15% e 50%) (Figura 2), limite de liquidez menor que 45% e índice de plasticidade inferior a 18%, enquadrando-se em quase todas as recomendações normativas (Tabela 7). O solo se enquadra na classificação A-4 da Highway Research Board – HBR, tratando-se de um solo com finos, argilas e siltes.



Figura 2 - Distribuição granulométrica do solo Latossolo Vermelho Amarelo



Fonte: próprio autor

Tabela 7 - Características físicas do solo pesquisado

Características físicas	Resultados	NBR 13553 (ABNT, 2005)
Massa Especifica saturada sup. Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,36	N/A
Massa Especifica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,42	N/A
Massa Especifica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,27	N/A
Limite de Liquidez (%)	33,3	≤ 45%
Limite de Plasticidade (%)	24,6	N/A
Índice de Plasticidade	8,7	≤ 18%
Material que passa #4,8mm (%)	100	100%
Material que passa #0,075 mm (%)	53,2	50%

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 8 é possível observar as porcentagens das frações quanto à composição granulométrica do solo utilizado. Com exceção do critério do material passante na peneira de #0,075 mm, os demais requisitos normativos são atendidos pelo solo utilizado na pesquisa.



**Tabela 8 – Frações granulométricas do solo (%)**

Fração	Porcentagem retida (%)
Pedregulho	1,54
Areia	39,66
Silte	34,60
Argila	24,20
Total	100,00

Fonte: próprio autor

#### 4.1.2 Caracterização da areia de RCC

Os resultados da caracterização física da areia reciclada podem ser visualizados na Tabela 9. Essa apresenta massa específica menor que o agregado natural, devido a sua baixa densidade. Além disso, deve-se atentar para a elevada capacidade de absorção de água do agregado reciclado, uma vez que esse fator pode comprometer a resistência e a durabilidade do produto final.

Esse comportamento em relação à absorção de água era previsto, tendo em vista que o RCC possui materiais em sua composição mais susceptíveis a absorção de água, como a cerâmica, gesso, cimento entre outros. Contudo, os resultados obtidos são aceitáveis de acordo com o especificado na NBR 15116 (ABNT, 2004) <sup>(24)</sup>, que estabelece valor menor ou igual a 17%.

**Tabela 9 - Caracterização física da areia reciclada de RCC produzidos na recicladora.**

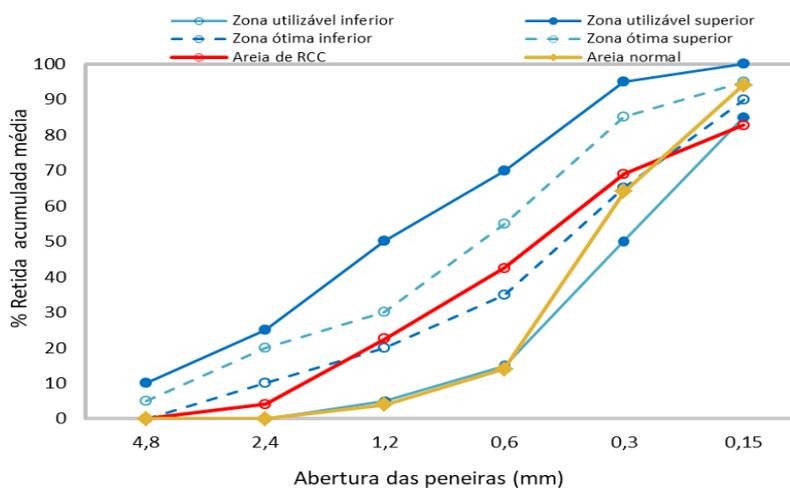
Características físicas	Areia RCC	Areia Natural
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,1	2,62
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,89	-
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,39	2,63
Absorção de água (%)	11,06	0,35
Modulo de finura	2,48	1,76

Fonte: Próprio autor



A areia de RCC encontra-se dentro dos limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo, pois se enquadra dentro da zona utilizável prevista na NBR 7211 (ABNT, 2009)<sup>(25)</sup> conforme pode ser observado na Figura 3. Nota-se que sua composição granulométrica apresenta melhor enquadramento do que a areia natural proveniente do Rio Cuiabá (normal).

Figura 3 – Curva granulométrica da areia de RCC



Fonte: próprio autor

## 4.2 Caracterização Física e Mecânica das Misturas

### 4.2.1 Estado fresco

A partir dos dados do diâmetro de espalhamento (Tabela 10), é possível perceber que a incorporação do RCC nas misturas T2 (50% RCC) e T3 (100% RCC) proporcionou maior coesão e maior trabalhabilidade às misturas. Este comportamento pode ter ocorrido devido a maior entrosamento das partículas nas misturas, já que a areia de RCC é bem graduada conforme Figura 3. O baixo espalhamento observado na mistura T1 (100% SOLO) se deve ao fato de esta ser composta apenas por solo, e por ser um material muito fino, corroborou para a redução observada do espalhamento, inclusive não atendendo o limite especificado para os traços dosados de 660 – 750mm.



Tabela 10 - Caracterização das dosagens no estado fresco

Misturas	Diâmetro (mm)	% Material
T1	430	100% SOLO
T2	610	50% RCC/ 50% SOLO
T3	765	100% RCC

Fonte: Próprio autor

Percebe-se que as misturas com menor quantidade de finos (T2) (híbrida) e (T3)(cimento+areia), as quais possuíam porcentagem de RCC em sua composição, contendo partículas com diferentes granulometrias, houve melhor entrosamento entre as partículas na mistura, proporcionando assim maior fluidez. Nota-se que, mesmo reduzindo o teor de água nestas misturas, que o diâmetro do espalhamento se elevou. Assim, é conveniente nos próximos estudos manter constante o fator água/cimento e alterar o teor de aditivo para manter o espalhamento o mais homogêneo possível entre as misturas.

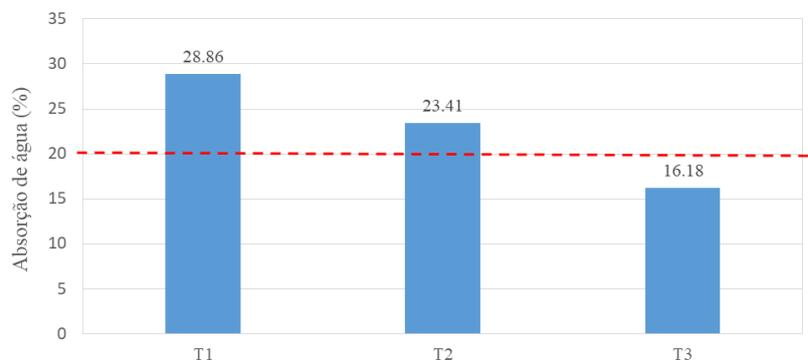
## 4.2.2 Estado Endurecido

### 4.2.2.1 Absorção de água

Observa-se que apenas a mistura T3 (100% RCC) apresentou índices de absorção de água dentro do limite estabelecido pela norma NBR 13555 (ABNT, 2012)<sup>(26)</sup>, ou seja, inferior a 20% (Figura 4). As misturas T1 e T2 apresentou maior absorção do que o indicado em norma. Destaca-se que quanto menor a taxa de absorção de água pelas misturas, menor será sua suscetibilidade ao ataque por agentes agressivos. O fato da mistura T<sub>3</sub> está relacionado a menor quantidade de vazios gerados na mistura devido ao seu menor fator a/c mas também pelo fato de ser composta totalmente por areia reciclada.



Figura 4 - Resultado do ensaio de absorção de água (%)

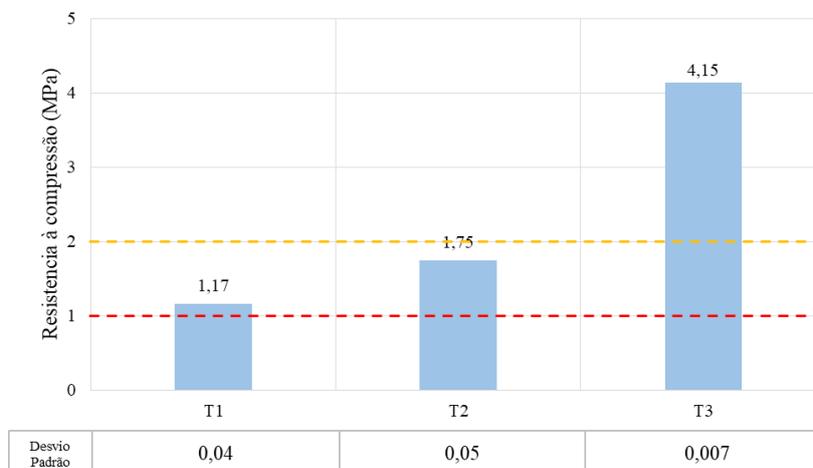


Fonte: Próprio autor

#### 4.2.2.2 Resistência à compressão

Observa-se que todas as misturas atenderam o requisito mínimo de resistência estabelecido pela NBR 13553 (ABNT, 2005)<sup>(27)</sup>, para paredes monolíticas de solo-cimento, ou seja, resistência superior a 1,0 MPa após sete dias de cura. No caso para a produção de tijolos de solo-cimento, a NBR 8491 (ABNT, 2012)<sup>(28)</sup> especifica resistência superior/igual a 2,0 MPa.

Figura 5 - Resistência à compressão axial das misturas de SCAA



Fonte: Próprio autor

Observou-se que, a partir da substituição de solo por RCC, houve aumento gradativo nos valores de resistência à compressão dos corpos de prova, em parte decorrente da redução do fator a/c na mistura, mas também pela retirada do solo e introdução do RCC. A mistura T3 (100%) foi a única que alcançou resistência à compressão superior a requerida pela NBR 8491 de 2,0 MPa.



## 5. CONCLUSÃO

Em relação a resistência mecânica, observou-se que é viável a substituição do solo pelo agregado reciclável, até 100% de substituição, já que a mistura T3 com 100% de RCC apresentou os melhores resultados. Quanto a absorção, observou-se que a substituição do solo pelo agregado reciclável ocasionou a diminuição da absorção por parte das misturas, o que é favorável para evitar patologias em possíveis utilizações desse material como paredes monolíticas.

Por meio da pesquisa pode-se concluir através dos estudos preliminares a viabilidade da utilização da incorporação de areia de RCC em misturas de solo-cimento autoadensável. Assim será conduzido um novo estudo agora com traços com incorporações intermediárias, ou seja, 25% e 75% de teores de incorporação de resíduo de areia, visando determinar aquele que atenda os requisitos físicos e mecânicos exigidos pelas normas brasileiras. Nesse estudo, o fator a/c será mantido constante, visando tornar as misturas comparáveis entre si. Variar-se-á o teor de aditivo visando manter o espalhamento o mais homogêneo possível nas misturas pesquisadas.

Assim, a incorporação de resíduos da construção civil apresenta potencial como material a ser utilizado para a confecção de paredes monolíticas de solo-cimento autoadensável, tendo em vista o seu enquadramento dentro dos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas. Destaca-se que sob o aspecto ambiental, a incorporação é benéfica, pois reaproveita os resíduos oriundos da construção civil, além de reduzir a extração de novos recursos naturais (no caso o agregado de areia natural).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights, *Construction and Building Materials*, v.40, pp. 729-737, 2013.
2. FREITAS, M. I. **Os resíduos de construção civil no município de Araraquara**. Dissertação de mestrado apresentada ao Centro Universitário, 2009. p. 89
3. BARBOZA, C. S. **Avaliação físico-mecânica do solo cimento auto adensável para fabricação de parede monolíticas**. Tese (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2014.
4. SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo – cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira (SP)**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2000.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.



6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7181**: Solo -Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26** - Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**- Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52** - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30** - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto auto adensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.
17. BERTÉ, S. D. D; ALCANTARA, M. A. M. Estudo do comportamento do solo-cimento auto-adensável. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 7, n. 2, p. 16-31, 2013.
18. MARTINS, A. P. de S. **Desenvolvimento, Caracterização Mecânica e Durabilidade de Compósitos Solo-Cimento Auto adensáveis Reforçados Com Fibras De Sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2014.
19. CLAVERIE, J. **Estudo da influência da cinza de casca de arroz e da cal nas propriedades do solo-cimento auto adensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2015.
20. MILANI, A. P. da S., BARBOZA, C. S. B., Contribuição ao estudo de propriedades do solo cimento autoadensável para fabricação de paredes monolíticas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 143-153, out./dez. 2016.
21. FERNANDES, G. F. **Utilização do solo-cimento auto adensável na fabricação de blocos de alvenaria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2017.
22. SOUZA, B. R.; PAZ, J. G. S.; MILANI, A. P. S., **Estudo da Viabilidade Técnica do Solo-Cimento Auto adensável para Fabricação de Paredes Monolíticas In Loco**. In: XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, São Paulo – SP, 2016.



23. LLAJARUNA, M. A. V. **Estudo do solo-cimento auto adensável para fabricação de tijolos de pó de mármore e resíduos de construção**. Dissertação Mestrado Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2017. 75 p.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116** – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** - Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13555**: Solo-cimento - Determinação da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491** – Tijolo de solo cimento - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.



## ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

**Alves, Brenda (1); Vaz, Camila (2); Moraes, Elizete (3); Bernardo, Karen (4); Souza, Grazielle (5)**

(1) PPGINDE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. – brendamaiara.oliveira@gmail.com; (2) Universidade Federal do Pará – camila.opcomputador@gmail.com; (3) Universidade Federal do Pará – eli7moraes@gmail.com; (4) PPGINDE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. – engkarenbernardo@gmail.com; (5) Universidade Federal do Pará – grazielle\_tigre@hotmail.com

### RESUMO

O trabalho tem como objetivo realizar um estudo de dosagem de concreto autoadensável (CAA) utilizando substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados, oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD). O programa experimental consistiu na produção de CAA com três teores de substituição (10%, 20%, 30%) do agregado miúdo natural (AMN) por Agregado miúdo reciclado (AMR), caracterizando-o segundo a NBR 15823-1. Foi utilizado um cimento CP-II-E e a sílica ativa como adição mineral. O agregado miúdo natural utilizado foi a areia, como agregado graúdo utilizou-se a brita, além de aditivo superplastificante. A metodologia consistiu em uma adaptação do método de Gomes para concretos autoadensáveis. O CAA no estado fresco foi avaliado através dos ensaios: de espalhamento, tempo de escoamento no Funil V e a Caixa L. Apesar de reduzir as propriedades no estado fresco, foi possível concluir que a utilização de teores de até 30% de agregados miúdos reciclados provenientes dos resíduos de construção e demolição, na produção de CAA é tecnicamente viável, desde que sejam consideradas as particularidades e limitações do material reciclado.

**Palavras-chave:** Concreto Autoadensável, Agregado reciclado de concreto, Resíduos da construção civil.

## STUDY OF MIX-DESING OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

### ABSTRACT

The objective of this work was to perform a self-compacting concrete (SCC) dosage study using partial replacement of natural aggregates by recycled aggregates obtained from construction and demolition waste (CDW). The experimental program consisted in the production of CAA with three percentages of substitution (10%, 20%, 30%) of the natural fine aggregate (NFA) per recycled fine aggregate (RFA), characterizing it according to NBR 15823-1. Was used cement CP-II-E and silica fume as supplementary material. The natural fine aggregate used was sand. The coarse aggregate was the crushed gravel, and a superplasticizer additive. The applied methodology included an adaptation of the Gomes method for self-compacting concrete. The SCC in the fresh state was evaluated through the tests: slump flow; flow time at Funnel V and Box-L. Although reducing the properties in the fresh state, it was possible to conclude that the use of percentages of up to 30% of recycled fine aggregate from construction and demolition wastes in the production of SCC is technically feasible, considering the particularities and limitations of the recycled material.

**Key-words:** Self-compacting concrete; Recycled concrete aggregate; Construction and demolition waste.



## 1. INTRODUÇÃO

A busca pela agilidade, facilidade de mão-de-obra, diminuição de custos, sustentabilidade e praticidade na construção civil, tem demandado estudos de novos materiais<sup>(1)</sup>. Com essa tendência, o concreto autoadensável (CAA) apresenta-se como um material com características especiais, como elevada fluidez, boa resistência à segregação, capacidade de se mover por ação da gravidade e preencher, sem necessidade de intervenção, os espaços dentro das fôrmas<sup>(2)</sup>.

A indústria da construção civil se caracteriza como uma atividade que apresenta grande fontes geradoras de resíduos, que muitas vezes não possuem uma destinação adequada<sup>(3)</sup>. Por conseguinte, tanto o consumo de recursos naturais como a produção de resíduos pela indústria da construção aumentaram significativamente nos últimos anos. O atual processo de “construção-demolição” impõe uma pressão significativa sobre os recursos naturais, com ênfase especial nos agregados naturais (AN) e resulta em grandes quantidades de resíduos de construção e demolição (RCD), ambos fatos com um impacto muito negativo sobre o meio ambiente.

Considera-se RCD todo e qualquer resíduo proveniente de atividades de construção civil. Os RCD incluem diferentes materiais, tais como plásticos, isolantes, papel, materiais betuminosos, madeiras, metais, concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, gesso, solo e outros<sup>(4)</sup>. Devido à atual crise econômica e ambiental, as demandas por um desenvolvimento mais sustentável na indústria da construção exigem uma abordagem diferente.

O reaproveitamento de resíduos de construção e demolição é um dos objetivos mais importantes da indústria da construção. A conversão de matérias-primas, materiais usados ou resíduos proporciona economias de energia significativas, reduzindo o número de processos industriais na produção de materiais<sup>(5)</sup>.

Neste contexto, uma solução, que a cada dia ganha força é o uso de agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição aos agregados naturais (AN), na produção de novos produtos de construção, sendo este considerado um dos métodos mais eficientes para agregar valor aos materiais reciclados<sup>(6,3)</sup>.

Assim, a sua utilização para a produção de um CAA pode ser uma abordagem alternativa para a destinação de RCD, contribuindo no sentido de trazer para o meio técnico uma possibilidade para minimizar a geração de resíduos nos canteiros de obra, reduzindo o consumo e a extração de



matérias primas, e atuando segundo os preceitos da sustentabilidade na construção civil. No entanto, para o CAA apresentar características reológicas adequadas, a determinação dos materiais e o método de dosagem, precisam ser criteriosos<sup>(7)</sup>, uma vez que a qualidade dos constituintes determinam a qualidade final do produto final<sup>(8)</sup>.

A substituição dos agregados naturais por agregados reciclados influencia as propriedades dos compósitos cimentícios tanto no estado fresco quanto no endurecido<sup>(9)</sup>. No que concerne as propriedades reológicas os autores<sup>(10)</sup> observaram maior espalhamento, menor tempo de escoamento no funil V e maior habilidade passante em concretos autoadensáveis (CAA's) quando empregaram agregados reciclados. Os autores ainda destacaram que o incremento na fluidez e na habilidade passante foram mais pronunciados em teores de substituição a partir de 50%, no caso da fração miúda, e até 50%, para a graúda.

Os autores<sup>(11)</sup> também apresentaram um trabalho das propriedades de CAA feitos com agregados graúdo reciclado (AGR) e uma mistura mineral obtida de um resíduo de alvenaria (RA), na qual foram testados cinco tipos de misturas de CAA onde o agregado graúdo virgem foi substituído pelo agregado reciclado em proporções de 0 a 100% em volume. As propriedades reológicas do CAA em estado fresco foram determinadas por meio de testes de fluxo de queda, testes de V-funil e L-box. Os resultados mostraram adequada trabalhabilidade e resistência à segregação, capacidade de passagem e capacidade de preenchimento.

No trabalho dos autores<sup>(12)</sup> procurou-se verificar a influência exercida pela substituição parcial dos agregados naturais por agregados reciclados de RCD nas propriedades reológicas de argamassas e concretos autoadensáveis e também nas propriedades mecânicas destes concretos. Os autores concluíram que os agregados reciclados comprometeram a fluidez das argamassas e dos concretos estudados, o que pode estar relacionado ao fato de apresentarem maior teor de materiais pulverulentos e maior absorção de água, quando comparados aos agregados naturais, mas que pôde ser corrigida com o incremento no teor de aditivo superplastificante nas misturas. Por outro lado, não foi verificada redução significativa nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos com 20% de agregados graúdos ou miúdos reciclados.

Os autores<sup>(13)</sup> estudaram CAA com agregado reciclado (AR) e cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos (CIRSU) como substitutos de agregado natural. O AR utilizada apresentou a seguinte composição média: 70% de concreto, 27% de alvenaria, 2% de betume e 1% de outros materiais não identificados. Os autores descobriram que o fluxo de slump é semelhante nas duas



misturas: a mistura apenas com agregado miúdo natural (AMN) e agregado graúdo reciclado (AGR) (concreto autoadensável com agregado reciclado - CAAAR) e aquela com CIRSU e AGR (concreto autoadensável com agregado graúdo reciclado - CAAAGR), respectivamente 750 mm e 780 mm. Assim, os autores concluíram que o AMN e a CIRSU contribuem de forma idêntica para a fluidez do CAA. Quanto ao tempo de fluxo, obtiveram resultados idênticos com AMN (CAAAR) e CIRSU (CAAAGR), 3 s.

Os pesquisadores<sup>(14)</sup> estudaram CAA com incorporação de agregado graúdo natural (AGN), agregado graúdo reciclado (AGR) e agregado de resíduos de mármore (ARM). As séries de controle foram produzidas com agregado de calcário moído (ACM) em diferentes relações água/aglomerante. De acordo com os resultados obtidos, a trabalhabilidade de CAA, como capacidade de fluxo, resistência ao bloqueio e resistência à segregação é aumentada pelo uso de pedaços de ARM em vez de ACM.

O estudo<sup>(15)</sup> investigou a utilização do agregado reciclado de concreto (ARC) em concreto novo. O ARC foi usado como substitutos parciais e totais do agregado natural de concreto (ANC) para produzir CAA. Diferentes misturas de CAA foram produzidas com ARC substituindo 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de ANC por peso. Os resultados do teste revelaram que a capacidade de preenchimento e capacidade de passagem de CAA melhorou para 30% e 50% de RCA. As misturas de CAA com 30% e 50% de ARC também possuem resistência adequada à segregação. Sugeriu-se que o ARC possa ser usado para produzir CAA, substituindo até 50% sem afetar as propriedades frescas do concreto.

Considerando as informações apresentadas, o presente trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo de dosagem para concreto autoadensável (CAA) através da substituição parcial de agregado miúdo natural por agregados reciclados oriundos de RCD. Já como objetivos específicos, busca testar composições do RCD no traço de concreto, a fim de se obter o melhor desempenho, analisar o comportamento dos agregados reciclados de RCD em estado fresco e analisar a performance quanto à absorção de água do concreto.



## MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.1 Materiais

O cimento utilizado na dosagem foi o CII-E-32, e como adição mineral, optou-se pelo uso da sílica ativa proveniente de um município próximo. A sílica trata-se de um material pulverulento decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. Já como agregado miúdo utilizou-se areia quartzosa e o agregado miúdo reciclado proveniente de RCD, o qual foi triturado a partir com um moinho de rolo e separado por sua granulometria. Como agregado graúdo natural, foi selecionado uma brita com diâmetro máximo de 9,5mm.

A fim de conhecer as características físicas dos agregados (naturais e reciclados), foram realizados ensaios de caracterização baseado nas normas regulamentadoras: NBR NM 248 (2003)<sup>(16)</sup>, NBR NM 52 (2009)<sup>(17)</sup>, NBR NM 53 (2009)<sup>(18)</sup>, NBR NM 45 (2006)<sup>(19)</sup> e NBR NM 30 (2001)<sup>(20)</sup>. Os resultados do ensaio de granulometria dos agregados podem ser observados na Tabela 1, que ainda mostra os resultados do diâmetro máximo e módulo de finura.

Tabela 1 – Composição granulométrica.

PENEIRA mm	RCD		AREIA		BRITA	
	% Média	% Média Retida Acumulada	% Média	% Média Retida Acumulada	% Média	% Média Retida Acumulada
9,5	0	0	0	0	12	12
4,75	1	1	0	0	15	27
2,36	15	15	0	0	36	63
1,18	17	32	2	2	18	81
0,6	18	50	27	29	8	89
0,3	28	78	67	96	6	95
0,15	14	92	4	100	3	98
0,075	6	98	0	100	-	-
Fundo	12	100	0	100	2	100
Total	100	-	100	-	100	-
Diâmetro Máximo:		4,75		1,2		9,5
Módulo de finura:		3,66		2,28		4,52

Dentro dos resultados apresentados na tabela 1 destaca-se que o AMR apresentou um módulo de finura superior ao agregado miúdo natural, essa diferença ocasiona uma redução da



trabalhabilidade (em misturas com mesma relação a/c), o que no caso do agregado reciclado já apresenta uma redução por conta da elevada absorção da argamassa antiga aderida aos grãos deste agregado<sup>(21)</sup>.

Portanto, de forma compreender o efeito ocasionado pela inclusão de AMR em argamassas e concretos é necessário realizar um ensaio de absorção no material, tornando possível comensurar a influência dessa argamassa aderida aos grãos para o aumento da absorção do agregado reciclado. Para este estudo optou-se pelo método proposto pelos autores<sup>(22)</sup>, que consiste em montar um aparato para a pesagem do material ao ser submerso, conforme Figura 1.

Figura 1. Ensaio de absorção do RCD.



Em seguida, anota-se o ganho de massa da amostra durante um período de 24 horas. Após a realização desse procedimento, é possível calcular a absorção do material reciclado e o ganho de massa em razão do tempo. Os resultados de massa específica, massa unitária e absorção dos agregados (miúdo e graúdos), encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios para o esqueleto granular.

ENSAIOS	NORMA	AGREGADOS	RESULTADOS
Massa específica	NBR NM 52 (2009)	Areia	2,663 g/cm <sup>3</sup>
		RCD	2,692 g/cm <sup>3</sup>
Massa Unitária	NBR NM 53 (2009)	Brita	2,71 g/cm <sup>3</sup>
		Areia	1549,739 kg/m <sup>3</sup>
		RCD	1872,235Kg/ m <sup>3</sup>
Absorção	NBR NM 45 (2006)	Brita	1380,61 Kg/ m <sup>3</sup>
		Areia	2,66%
		RCD	5,35%
	NBR NM 52 (2009)	Areia	2,66%
	LEITE et al. (2011)	RCD	5,35%
	NBR NM 53 (2009)	Brita	1,1%

Segundo os valores apresentados na tabela 2, pode-se constatar que a massa específica do agregado reciclado se enquadra acima do intervalo encontrado em algumas literaturas que vai de



2,10 g/cm<sup>3</sup> à 2,60 g/cm<sup>3</sup> (23, 24, 25, 26). A absorção do AMR, como evidenciado pelos resultados, é bem superior aos valores dos agregados naturais, corroborando com a literatura consultada.

Para garantir a trabalhabilidade dos concretos e das argamassas produzidas no estudo, foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato. Por fim, utilizou-se água potável proveniente da rede de distribuição da estação de tratamento de água. O tópico seguinte apresentará a metodologia utilizada para a produção do CAA com agregado proveniente de RCD.

## 1.2 Métodos

Nesta pesquisa foi utilizado o método de Gomes<sup>(9)</sup>, que fundamenta sua análise do traço através da otimização separada de duas fases: Pasta e Esqueleto granular. No entanto, com o objetivo de inferir sobre a influência da substituição do AMR no espalhamento das misturas, os autores optaram por realizar um estudo em argamassas, ao invés dos estudos em pasta como sugerido pelo método de Gomes<sup>(9)</sup>. Esse procedimento seguiu a metodologia demonstrada por <sup>(27)</sup> e <sup>(21)</sup>, que apresentaram o estudo da argamassa como fase complementar ao método.

Após a caracterização dos materiais, foi realizado o estudo das argamassas no estado fresco, segundo o demonstrado por <sup>(27)</sup>. Desta maneira, fixou-se uma relação a/c (0,47) e também uma relação percentual de sílica (10% Sp/c), testando diferentes percentuais de aditivos, com a finalidade de se obter o ponto de saturação do superplastificante. A tabela 3 apresenta os traços de argamassa testados.

Tabela 3 – Traços das argamassas produzidas.

TRAÇO	A/c	f/c	sp/c (%)	Cimento (g)	RCD (g)	Areia (g)	Sílica (g)	Aditivo (g)	Água (ml)
REF – AR (0,8 % SP)			0,8%		0	2200		8,8	511,5
REF – AR (1,0 % SP)			1,0%		0	2200		11,0	510,2
RCD – 10% (0,8 % SP)			0,8%		220	1980		8,8	511,5
RCD – 10% (1,0 % SP)			1,0%		220	1980		11,0	510,2
RCD – 20% (0,8 % SP)	0,47	10%	0,8%	1100	440	1760	110	8,8	511,5
RCD – 20% (1,0 % SP)			1,0%		440	1760		11,0	510,2
RCD – 30% (0,8 % SP)			0,8%		660	1540		8,8	511,5
RCD – 30% (1,0 % SP)			1,0%		660	1540		11,0	510,2



Os ensaios realizados na argamassa no estado fresco avaliam o espalhamento e o tempo de fluxo das argamassas. A avaliação do espalhamento é realizada preenchendo um tronco de cone com argamassa, depois medindo o espalhamento da amostra sob uma base nivelada.

A finalidade desse ensaio é verificar a fluidez da mistura, medindo os diâmetros de espalhamento, e o parâmetro adotado segue os valores da <sup>(28)</sup> de 240 a 260 para argamassas autoadensáveis. Durante os primeiros testes, observou-se que as argamassas com teores de aditivo inferior a 0,8% de Sp/c não apresentaram valores próximos aos estabelecidos, por isso o segundo ensaio foi realizado apenas com dois teores de superplastificante (0,8% e 1,0%).

O segundo ensaio realizado é o Cone de Marsh, que consiste de um cone oco de metal invertido, com uma abertura no topo e outra na parte inferior, com um bocal removível de 12 mm, adequado para argamassa. No interior do cone é colocado um volume de argamassa de 1 litro, em seguida é medido o tempo gasto para a saída de um volume de 500 ml.

O ensaio de determinação do esqueleto granular é utilizado para a determinação da maior massa unitária e do menor índice de vazios considerando as relações entre agregado graúdo/agregado miúdo. Esse procedimento é descrito por<sup>(29)</sup>. Inicialmente, os agregados foram misturados no interior de uma bombona, partindo de uma massa de 20 kg de agregado graúdo e 0 kg de agregado miúdo, fazendo variar a relação entre elas.

Para o cálculo da dosagem através do método de Gomes<sup>(9)</sup> é necessário determinar um volume de pasta para o cálculo do consumo de cimento de cada traço. Segundo os estudos de <sup>(30)</sup>, utilizou-se um volume de 40% para todos os traços, pois o teor apresentou resultado satisfatório em utilizações com agregados miúdos reciclados de concreto. A Tabela 4 apresenta os traços calculados.

Tabela 4. Traços para a produção dos concretos.

TRAÇO	PEDRISCO (kg)	RESÍDUO (kg)	AREIA (kg)	CIMENTO (kg)	SÍLICA (kg)	ÁGUA (kg)	Sp/c (%)
0% RCD (kg)	19,35	-	13,0	9,49	0,68	4,4	0,8
10 % RCD (kg)	19,35	1,29	11,72	9,49	0,68	4,48	1,0
20% RCD (kg)	19,35	2,58	10,41	9,49	0,68	4,52	1,0
30% RCD (kg)	19,35	3,87	9,11	9,49	0,68	4,56	1,0

O concreto foi submetido a diversos ensaios no estado fresco, no sentido de avaliar suas características de adensamento, habilidade passante e resistência a segregação. Para analisar a



fluidez foram utilizados os ensaios de Espalhamento e Funil V e para a análise da capacidade de atravessar armaduras e resistência à segregação foi usada a Caixa L. Na Tabela 5, estão apresentados os parâmetros estabelecidos para o atendimento dos tais critérios citados.

Tabela 5. Faixa dos parâmetros que asseguram o autoadensamento dos agregados.

PROPRIEDADES	ENSAIOS	PARÂMETROS	FAIXA IDEAL	
			Gomes et al. (2003)	NBR 15823-1 (2017)
Capacidade de preenchimento	Slump-flow	Extensão final do fluxo	60 a 75 cm	550 a 850
		$T_{50}$	$5 \pm 2$ s.	$\leq 2$
	Funil V	Tempo total de fluxo	$10 \pm 3$ s	$> 2$
Capacidade de Passagem	Caixa L	$T_{L20}$	$1 \pm 0,5$ s.	$< 9$
		$T_{L40}$	1,5s. a 3s.	9 a 25
		$RB = H2 / H1$	= 80	$\geq 0,80$

O ensaio de espalhamento é realizado segundo a NBR 15823-2<sup>(31)</sup>, e consistem em preencher o cones de Abrams sem compactar, em seguida levantá-lo lentamente, deixando o concreto se estender em cima de uma base nivelada e limpa. É calculada uma média de duas medidas perpendiculares das amostras ensaiadas.

Os ensaios do Funil V, realizado segundo a NBR 15823-5<sup>(32)</sup>, consiste em medir os tempos que as amostras de concreto levam para fluir totalmente através do orifício inferior do funil. Para estabelecer a habilidade passante é utilizado o ensaio com a Caixa L, segundo a NBR 15823-4<sup>(33)</sup>, que consiste em preencher o cômodo vertical da caixa com a amostra de concreto de aproximadamente 12 litros, e após a abertura de uma comporta são medidos os parâmetros TL20, TL40 e H2/H1, que são respectivamente, o tempo para o concreto em fluxo alcançar um comprimento horizontal de 20 cm, 40 cm e a relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa.

Para atestar se o material produzido se comportava como um CAA, os autores utilizaram ambos parâmetros <sup>(34: 9)</sup>, portanto considerando a mistura autoadensável apenas na ocasião do concreto adquirir resultados que se enquadravam nos valores de ambos.



## 3. RESULTADO E DISCUSSÃO

### 3.1 Estudo da argamassa

Como descrito na metodologia, no estudo foram realizados ensaios com argamassas alterando o teor de substituição de AMN por AMR. Os resultados dos ensaios realizados com as argamassas produzidas podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Espalhamento e tempo de fluxo das argamassas.

Traço	Espalhamento (mm)	Tempo de fluxo (s)	Análise Visual	
			Exsudação	Borda Uniformes
REF – AR (0,8 % SP)	254	58	Não	Sim
REF – AR (1,0 % SP)	281	47	Sim	Sim
RCD – 10% (0,8 % SP)	235	135	Não	Sim
RCD – 10% (1,0 % SP)	243	111	Não	Sim
RCD – 20% (0,8 % SP)	218	*	Não	Sim
RCD – 20% (1,0 % SP)	242	148	Não	Sim
RCD – 30% (0,8 % SP)	165	*	Não	Sim
RCD – 30% (1,0 % SP)	168	*	Não	Sim

\* Não apresentou resultado

Analisando as argamassas produzidas, pode-se constatar que a fluidez (medida pelo ensaio de espalhamento) sofreu uma redução de 67% com teores de substituição de até 30% e 1% de SP. O parâmetro adotado para a validação da mistura foi o descrito pela<sup>(28)</sup>, com espalhamento entre 240 a 260mm. Diante disso, para dar continuidade à próxima fase na produção do CAA, para o concreto de referência foi adotado um teor de 0,8% de superplastificante, uma vez que através dos resultados obtidos da Tabela 5, observa-se que foi o teor que atendeu ao parâmetro de espalhamento da<sup>(28)</sup>, enquanto que o teor de 1,0% ultrapassou o limite de 260mm. Para os demais traços com RCD o teor de 1,0% de superplastificante foi o único que atendeu ao requisito de espalhamento, pois os traços com 0,8% apresentaram espalhamento abaixo do mínimo.

O procedimento de pré-molhagem do AMR (Taxa de compensação de 80% da absorção) adotado, o qual teve como objetivo a saturação parcial do agregado reciclado de forma a reduzir o consumo da água de amassamento pelo AMR, não conseguiu contrabalancear a elevada perda de trabalhabilidade apresentada.



O tempo de fluxo, medido pelo ensaio do cone de Marsh, dos teores de: 20% com 0,8% de SP, 30% com 0,8% de SP e 30% com 1,0% de SP, não obtiveram resultados. Portanto, não foi possível realizar o estudo do ponto de saturação do aditivo através do ensaio do tempo de fluxo, utilizando-se o espalhamento para a sua determinação.

### 3.2 Esqueleto granular

De acordo com os resultados obtidos através do ensaio de massa unitária, a melhor composição para o esqueleto granular do CAA foi a relação areia/Brita de 0,67. Considerando que 60% dos agregados devem ser constituídos por agregado graúdo a e 40% por agregado miúdo. Esta combinação foi selecionada apresentou o menor teor de vazios de 31%.

### 3.3 Concreto autoadensável

De forma a avaliar as propriedades no estado fresco dos concretos produzidos, foram realizados os ensaios de autoadensabilidade descritos na metodologia. Os resultados das amostras ensaiadas estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7. Ensaio de autoadensabilidade.

Traço	REF – AR (0,8 %SP)	RCD – 10% (1,0 % SP)	RCD – 20% (1,0 % SP)	RCD – 30% (1,0 % SP)	NBR 15823 - 1 2017	Gomes et al. (2009)
Espalhamento (mm)	750	718	715	715	550 a 850	600 a 800
T <sub>50</sub> (s)	3,52	3,84	4,18	4,28	≤ 2 > 2	2 a 7
Tempo de Fluxo (s)	4	6	8	9	< 9 9 a 25	6 a 15
H2/H1	0,96	0,92	0,86	0,83	≥ 0,80	≥ 0,80

Analisando os resultados dos ensaios de autoadensabilidade dos traços produzidos foi possível constatar que, a fluidez (propriedade analisada através do ensaio de espalhamento) foi a propriedade que mais apresentou redução durante o estudo em argamassas e o mesmo não foi evidenciado de forma semelhante nos traços de CAA com RCD. A redução do espalhamento do traço de RCD, com até 30% de substituição, foi de 5% comparado ao traço de referência. Todos os teores de espalhamento encontraram-se dentro dos parâmetros propostos pela <sup>(34)</sup>, e por <sup>(9)</sup>.



De acordo com os resultados do tempo de fluxo, no ensaio de espalhamento (T50) e no funil-V, houve um aumento no tempo de escoamento do material, demonstrando que o AMR, por deixar a mistura menos trabalhável, também impactou de maneira negativa na fluidez do CAA. No entanto, como demonstrado pelos resultados apresentados na tabela Tabela 6, o tempo de fluxo se manteve dentro dos parâmetros estabelecidos.

O Ensaio na caixa-L, apresenta a análise de duas propriedades, a habilidade passante e capacidade de preenchimento, mostrando-se um dos ensaios mais completos para a análise da autoadensabilidade do CAA. Todos os traços apresentaram índices acima dos parâmetros propostos pela <sup>(34)</sup>, e por <sup>(9)</sup>. A análise visual das amostras não demonstrou problemas com exsudação e segregação para os teores de substituição de até 30% de RCD.

Os autores <sup>(23)</sup> indicaram o ensaio da caixa-L como sendo o procedimento experimental mais comum para avaliar a habilidade passante, e ao avaliarem a reologia dos traços de concreto autoadensável com agregado miúdo reciclado de concreto. Segundo <sup>(35)</sup>, este ensaio permite a verificação visual da capacidade de preenchimento dos espaços e autonivelamento do CAA e afirma que se o CAA for aprovado neste ensaio, provavelmente irá obter bons resultados nos demais ensaios para a verificação da habilidade de passar por obstáculo, a exemplo do Anel-J e da Caixa em U.

Relacionando os resultados apresentados pelos ensaios de autoadensabilidade a tendência que se observou foi uma redução da viscosidade plástica, habilidade passante e aumento da segregação, os três parâmetros que determinam a eficiência do concreto autoadensável. No entanto, os resultados se mostraram dentro dos parâmetros normatizados.

## 4 CONCLUSÃO

Através dos resultados desse estudo de dosagem, pode-se concluir que todos os traços de concreto autoadensável apresentaram valores dentro do estabelecido proposto por <sup>(9)</sup> e <sup>(34)</sup>. Portanto, utilizando uma metodologia modificada, foi possível a produção de um CAA com AMR que estivesse dentro dos parâmetros estabelecidos.

Sobre avaliar o efeito da substituição do agregado miúdo natural por AMR na autoadensabilidade do CAA, todos os parâmetros que caracterizam um CAA sofreram redução em função do aumento do teor de AMR. Mas a metodologia tornou possível a produção de concretos autoadensáveis



utilizando teores de até 30% de substituição, com o mínimo de ajustes necessários, enquadrando-os nos parâmetros estabelecidos pela <sup>(34)</sup> e por <sup>(9)</sup>.

Conclui-se, portanto, que as adaptações realizadas no método de Gomes<sup>(9)</sup>, utiliza como base o estudo de duas fases distintas (argamassa e esqueleto granular), provaram-se satisfatórias na produção de CAA com agregado miúdo reciclado de RCD, com o mínimo de ajustes necessários. Portanto, o presente trabalho demonstrou que, de acordo com os ensaios de autoadensabilidade, é possível produzir concreto com propriedades autoadensáveis, utilizando o resíduo de construção e demolição (RCD), como agregado miúdo.

## 5. REFERÊNCIAS

1. MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante**. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
2. REPETTE, W. L. **Concreto de última geração: presente e futuro. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização**. Edição G. C. Isaia. São Paulo: Ibracon, 2005. V2, pp. 1509-1550.
3. SOUZA, André L. V; SCHWANTES, Nicole; SOUZA, Isabela C.; CAVALHEIRO, Caroline D.; PORTO, Maria F.; FONSECA, Matheus S.; TORALLES, Berenice M. **Concreto AutoAdensável com Agregados Reciclados de Concreto (ARC)**. ENTAC2016 - São Paulo, Brasil, 21, 22 e 23 de setembro de 2016.
4. SILVA, VINÍCIUS A. DA; FERNANDES, ANDRÉ L. T. **Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG**. Soc. & Nat., Uberlândia, ano 24 n. 2, 333-344, mai/ago. 2012
5. ISMAIL, SALLEHAN; RAMLI, MAHYUDDIN. **Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications**. Construction and Building Materials. 44. 464–476. 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014. 2013.
6. BRASILEIRO, L. L. **Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural do Concreto Asfáltico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2013.
7. FREITAS, E. R. F.; BORJA, E. V. D.; ANJOS, M. A. S. D.; PEREIRA, A. D. C.; VIANA, J. S. **Estudo das adições e aditivos minerais nas propriedades de argamassas autonivelantes**. Anais do V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica (CONNEPI). Natal, 2010.
8. TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.
9. GOMES, PAULO CESAR CORREIA; GETTU, RAVINDRA; AGULLÓ E JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO. **Concreto Auto-Adensável: Um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto**. 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003.



10. GÜNEYISI, E., GESOGLU, M., ALGIN, Z., et al. **Rheological and fresh properties of selfcompacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates.** Construction and Building Materials, v. 113, pp. 622-630, 2016.
11. SILVA, Y. F.; ROBAYO, R.A.; MATTEY, P.E., et al. **Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of ma-sonry and recycled concrete.** Construction and Building Materials, v. 124, pp. 639-644, 2016.
12. CAMPOS. R. S.; BARBOSA, M. P.; PIMENTEL, L. L.; MACIEL, G. D. F. **Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável.** Matéria (Rio J.) v.23 n.1 Rio de Janeiro, 2018.
13. CORINALDESI, V.; MORICONI, G. **Concreto autoadensável: Uma grande oportunidade para reciclagem de materiais.** In: Conferência Internacional RILEM sobre o Uso de Materiais Reciclados em Edificações e Estruturas, 2004, 10 p. 2004.
14. UYGUNOĞLU, T.; TOPÇU, İ.B; ÇELIK, AG. **Uso de resíduos de mármore e agregados reciclados em concreto auto-adensável para a sustentabilidade ambiental.** Jornal de Produção Mais Limpa. v.84. pp. 691 – 700. 2014.
15. SAFIUDDIN, M.; SALAM, M. A.; JUMAAT, M.Z. **Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete.** Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 11. pp. 1023-1041. 2011.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2009.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001.
21. LISBÔA, E.M. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004, 121 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.
22. LEITE, M. B. et al. **Proposta de Adaptação do Procedimento Proposto Por Leite (2011) Para Determinação da Absorção de Agregados Reciclados de Resíduo de Construção Demolição.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 7. Fortaleza, 2011. Anais... Fortaleza, 2011.
23. CARRO-LÓPEZ, D., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., DE BRITO, J., MARTÍNEZ-ABELLA, F., GONZÁLEZ-TABOADA, I., SILVA, P. **Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates.** Constr. Build. Mater., 96, 2015.



24. FAN, Cheng-Chih; HUANG, Ran; HWANG, Howard; CHAO, Sao-Jeng. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes.** Construction and Building Materials. Volume 112, 1 June 2016.
25. OMRANE, Mohammed; et al. **Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan.** Journal of Cleaner Production. Volume 165, 1 November 2017.
26. PEDRO, D.; EVANGELISTA, L., DE BRITO, D. **Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties.** Construction and Building Materials. Volume 154, 15 November 2017.
27. CAVALCANTI, D. J. de H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais.** 2006, 141 p. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.
28. EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification and guidelines for Self-Compacting Concrete.** 2002.
29. GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** São Paulo: Pini, 2009.
30. BERNARDO, Karen. **Concreto autoadensável com agregado miúdo reciclado de concreto.** 2019. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.
31. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2.** Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2014.
32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5.** Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do Funil-V. Rio de Janeiro, 2014.
33. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4.** Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da Caixa-L e da Caixa U. Rio de Janeiro, 2014.
34. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-1.** Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.
35. ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados.** São Paulo-SP, 2008. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



# INFLUÊNCIA DA DIATOMITA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS FRENTE AO ATAQUE ÁCIDO

Ana Amélia Mota dos Santos <sup>(1)</sup>; Livia Pedra Pessanha <sup>(2)</sup>; Guilherme Chagas Cordeiro <sup>(3)</sup>

(1) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF - e-mail: anamota.eng@gmail.com;

(2) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF - e-mail: liviappessanha@live.com;

(3) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro– UENF - e-mail: gcc.uenf@gmail.com.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do emprego de uma diatomita calcinada proveniente da Bahia (Brasil) nas propriedades de argamassas submetidas ao ataque por ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). As argamassas foram produzidas com a substituição de 0, 10, 20 e 30% (em massa) de cimento pela diatomita. Corpos de prova das diferentes misturas produzidas foram mantidos em cura por imersão em água saturada de cal por 28 dias e, em seguida, foram divididos em dois grupos iguais. O primeiro grupo continuou em água por mais 63 dias e o segundo foi imerso em solução de  $H_2SO_4$  (2%) pelo mesmo período. Ensaios de variação de massa e resistência à compressão axial foram conduzidos para uma avaliação do efeito da diatomita frente ao ataque ácido. Os resultados mostraram que o teor de substituição de cimento pela diatomita influenciou de forma significativa a resistência à compressão das argamassas. O melhor desempenho mecânico foi alcançado pela mistura com maior teor de pozolana. Após exposição ao  $H_2SO_4$ , houve uma redução considerável da resistência das argamassas. Entretanto, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre a mistura de referência e as misturas com diatomita.

**Palavra-Chave:** Diatomita, Pozolana natural, Ataque ácido, Durabilidade.

## INFLUENCE OF DIATOMITE ON MORTAR MECHANICAL BEHAVIOR UNDER ACID ATTACK

### ABSTRACT

The present work aims to evaluate the influence of a Brazilian calcined diatomite from Bahia on the properties of high-performance mortars exposed to sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) attack. The mortars were produced with the replacement of 0 (control), 10, 20 and 30% (by mass) of cement by diatomite. Specimens of the different mixes were kept in saturated lime-water curing for 28 days. Then, the specimens were divided into two equal groups. The first group continued in water for more 63 days and the second group was immersed in 2%  $H_2SO_4$  solution for the same time. Tests of mass variation and compressive strength were carried out aiming an evaluation of the effect of diatomite over acid attack. The results showed that the cement substitution content by diatomite significantly influenced the compressive strength of mortar. The best mechanical performance was achieved by mixing with higher pozzolan content. After exposure to  $H_2SO_4$ , there was a considerable reduction in mortar resistance. However, no statistically significant differences were observed between the reference mixture and the diatomite mixtures.

**Keywords:** Diatomite, Natural pozzolan, Acid attack, Durability.



## 1. INTRODUÇÃO

O ataque ácido se caracteriza pela formação da gipsita ou da etringita por meio das reações químicas entre ânions  $\text{SO}_4^{2-}$  com o hidróxido de cálcio (CH) ou com as fases aluminato do cimento Portland. Esses compostos são formados nas camadas superficiais do material cimentício e, como são expansivos, induzem tensões internas que geram degradação <sup>(1)</sup>. Além disso, o mecanismo de degradação da pasta de cimento exposta ao ataque por ácidos também está associado a descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando em perda de resistência e desintegração do material cimentício <sup>(2)</sup>. Uma importante alternativa para estruturas de concreto sujeitas ao ataque ácido consiste no emprego de pozolanas <sup>(3)</sup>. A redução do teor de CH, e consequente formação de C-S-H, decorrente das reações pozolânicas, combinadas ao aumento da compacidade da matriz de cimento pela ação de empacotamento promovida pelas partículas da pozolana, podem promover melhoria da resistência mecânica e da durabilidade da pasta endurecida <sup>(4, 5)</sup>.

A diatomita é uma pozzolona natural e possui elevado teor sílica amorfa em sua composição. Portanto, quando utilizada como aditivo mineral, pode promover o aumento da resistência e durabilidade do sistema cimentício <sup>(6)</sup>. Adicionalmente, a inclusão da diatomita na mistura promove uma maior densificação do concreto, que também será responsável pela melhoria do desempenho da estrutura <sup>(7)</sup>. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do emprego de uma diatomita nas propriedades de argamassas submetidas ao ataque por ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). As argamassas foram produzidas com a substituição de 0, 10, 20 e 30% (em massa) de cimento pela diatomita. Ensaios de variação de massa e de resistência à compressão axial foram conduzidos para uma avaliação do efeito da diatomita frente ao ataque ácido ao longo de 63 dias.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Produção e caracterização da diatomita

Nesse estudo, uma diatomita calcinada em forno rotativo a 900 °C obtida em uma usina de beneficiamento (Ciemil Diatomita) localizada na cidade de Vitória da Conquista-BA foi utilizada. Após coleta, o material foi submetido à moagem a seco em um moinho de bolas tipo Sonnex (Pavitest) por 60 min, visando a obtenção de um tamanho característico  $D_{50}$  abaixo a 10  $\mu\text{m}$ .



As granulometrias das amostras *in natura* (DIATin) e da moída (DIAT60) foram obtidas via analisador de partículas a laser Mastersizer 2000 (Malvern Instruments). A composição química, em termos de óxidos, foi determinada através de ensaio de espectroscopia de fluorescência de raios X, em equipamento EDX 800 da Shimadzu e a perda ao fogo foi determinada conforme procedimentos descritos na NBR NM 18 <sup>(8)</sup>. A composição mineralógica da diatomita foi determinada por difratometria de raios X em difratômetro Rigaku Miniflex 600 operando com radiação Cu-K $\alpha$ , tensão de 40 kV, corrente de 15 mA. As condições de análise foram: ângulo 2 $\theta$  entre 8° e 70°, passo de 0,02° e velocidade angular de 10°/min.

A atividade pozolânica foi avaliada de acordo com o método Chapelle modificado <sup>(9)</sup>. Com base nessa metodologia, a reatividade do material foi obtida por meio de uma solução aquosa composta por uma mistura de 1 g do material estudado, 2 g de CaO e 250 g de água isenta de CO<sub>2</sub>, mantida a 90 $\pm$ 5 ° C durante 16 h. O resultado do ensaio foi expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio fixado por grama de material pozolânico.

Para a produção das argamassas, foi utilizado um cimento Portland CPP Classe G <sup>(10)</sup>. A sua composição química, em termos de óxidos, é mostrada na Tabela 1. O agregado miúdo utilizado foi uma areia média (proveniente do Rio Paraíba do Sul) com módulo de finura de 2,6 e massa específica 2,60 g/cm<sup>3</sup>. Um aditivo superplastificante a base de éter carboxílico modificado com massa específica de 1,21 g/cm<sup>3</sup> e teor de sólidos de 28,9% (em massa) e água deionizada também foram utilizados para produção das argamassas.

**Tabela 1 - Composição de óxidos e perda ao fogo (% em massa) dos materiais cimentícios.**

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	NaO <sub>2</sub>	MgO	Perda ao fogo
Diatomita	83,4	12,0	1,8	0,9	0,4	0,3	0,8	–	–	0,2
Cimento	21,9	3,6	2,7	4,5	–	64,3	0,3	0,1	1,5	1,1

## 2.2 Dosagem, cura e caracterização das argamassas

As argamassas foram produzidas com uma relação água/aglomerante (a/ag) igual a 0,4 e teores de substituição do cimento pela diatomita de 0, 10, 20 e 30% (em massa). O teor de superplastificante de cada mistura foi definido visando a obtenção de uma consistência de 210  $\pm$  10mm. Os procedimentos de mistura e a determinação do índice de consistência das argamassas foram realizados conforme a NBR 13276 <sup>(11)</sup>. As proporções e os valores dos espalhamentos das misturas estão apresentados na Tabela 2.



**Tabela 2 – Consumo de materiais e valores de espalhamentos das argamassas\*.**

Mistura	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )			a/ag	Superplastificante (%)	Espalhamento (mm)
	Cimento	DIAT60	Areia			
M-REF	709,1	0	1772,7	0,4	0,10%	220
M-DIAT60-10%	638,2	70,9	1772,7	0,4	0,10%	214
M-DIAT60-20%	567,3	141,8	1772,7	0,4	0,12%	220
M-DIAT60-30%	496,4	212,7	1772,7	0,4	0,13%	203

\*Nota: M-REF: mistura de referência; M-DIAT60-X% (X = 10, 20 ou 30%) as misturas contendo DIAT60.

Para a avaliação da resistência à compressão axial das argamassas, corpos de prova foram moldados em 2 camadas, com adensamento mecânico realizado em uma mesa vibratória. Os moldes foram mantidos em câmara úmida (temperatura de  $23 \pm 1^\circ \text{C}$ ) por 24 h e, após esse período, foram desmoldados e submetidos à cura por imersão em água saturada de cal por 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram divididos em dois grupos iguais, sendo que o primeiro grupo continuou em cura em água saturada de cal por mais 63 dias e o segundo foi imerso em uma solução com concentração de 2% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pelo mesmo período. Os procedimentos de ataque por ácido sulfúrico foram realizados com base em metodologia descrita por <sup>(12)</sup>.

O pH da solução foi monitorado durante todo o período de exposição. A variação de massa dos corpos de prova de todas as misturas foi monitorada periodicamente (duas vezes por semana) durante o tempo de exposição ao ataque. Para a determinação da massa, cada corpo de prova foi retirado da solução, lavado em água corrente para remoção dos materiais soltos, pesados e devolvidos a solução. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em corpos de prova cúbicos (50 mm de aresta), de acordo com a ASTM C109M-16 <sup>(13)</sup>. As rupturas ocorreram em máquina universal Shimadzu UHI-500kNI, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente com emprego da análise de variância (ANOVA), seguida de teste de comparação múltipla de médias (CMM).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização da diatomita moída (DIAT 60)

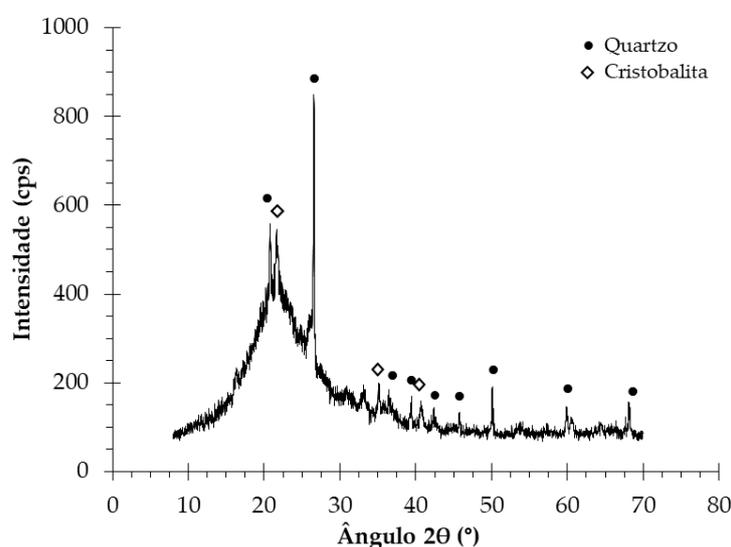
A diatomita estudada possui 83,4% de  $\text{SiO}_2$  e 12% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , além de óxidos como  $\text{SO}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em menores quantidades (Tabela 1). Santos *et al.* <sup>(14)</sup> encontraram composições químicas similares para diatomitas calcinadas em diferentes temperaturas. A baixa perda ao fogo da diatomita estudada (0,2%) resulta do procedimento de calcinação. Yilmaz e Ediz <sup>(15)</sup> e Posi *et al.* <sup>(16)</sup> também



encontraram valores de perda ao fogo abaixo de 1% para diatomitas calcinadas em temperaturas variando entre 800 e 1000°C.

A Figura 1 mostra o difratograma de raios X da DIAT60, que revela a presença picos cristalinos de quartzo e cristobalita. Observa-se, ainda, no difratograma a presença de um halo de amorfização (entre 22 e 25°), que indica a presença de sílica amorfa. O resultado do ensaio de Chapelle modificado indica um consumo de 1.178 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de DIAT60. Esse valor é superior ao consumo mínimo estabelecido pela NBR 15894-1 <sup>(17)</sup> para um metacaulim (750 mg  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de pozolana) e evidencia a elevada atividade pozolânica do material estudado.

Figura 1 – Difratograma de raios X da DIAT60.



### 3.2 Variação de massa argamassas

Ao longo de 63 dias de ataque ácido, os valores de perda de massa das misturas com DIAT60 são similares à perda observada na M-REF, com exceção da argamassa com 30% de diatomita, conforme observado na Figura 2. Visualmente, dois comportamentos distintos podem ser observados no que se refere à perda de massa ao longo do tempo, principalmente na comparação entre a referência e a argamassa com maior teor de DIAT60 (30%). A referência é caracterizada pelo deslocamento das fases formadas durante o ataque (gesso e etringita), o que resulta em pequena espessura da região degradada (Figura 3a). O deslocamento mais intenso da referência pode ser explicado pela maior velocidade de formação de gesso e etringita em um sistema com mais hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, com maior pH. A mistura M-DIAT-30%, por sua vez, apresenta a camada degradada mais espessa dentre todas as misturas avaliadas (Figura 3d). De



fato, observa-se que a maior espessura média da região degradada é observada para o M-DIAT60-30% ( $2,28 \pm 0,39$  mm), enquanto M-REF apresenta uma espessura média da região igual a apenas  $0,65 \pm 0,29$  mm. As outras duas misturas confirmam o aumento da espessura da região degradada à medida que o teor de DIAT60 na mistura aumenta (M-DIAT60-10% com  $0,88 \pm 0,27$  mm e M-DIAT60-20% com  $1,43 \pm 0,11$  mm).

Figura 2 - Variação de massa das argamassas ao longo de 63 dias de ataque ácido.

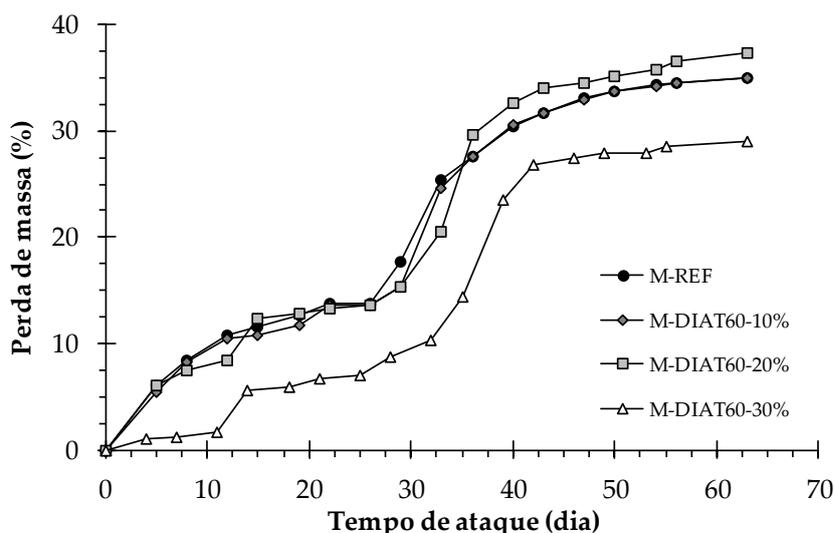
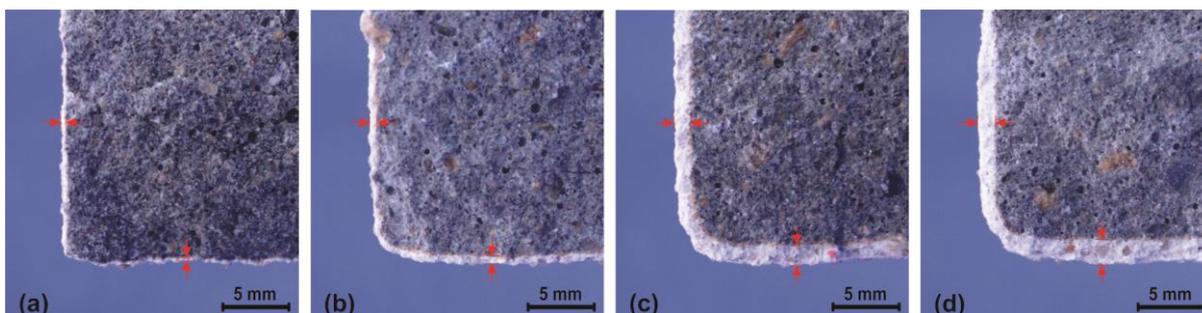


Figura 3 – Espessura da região degradada dos corpos de prova de M-REF (a), M-DIAT60-10% (b), M-DIAT60-20% (c) e M-DIAT60-30% (d).



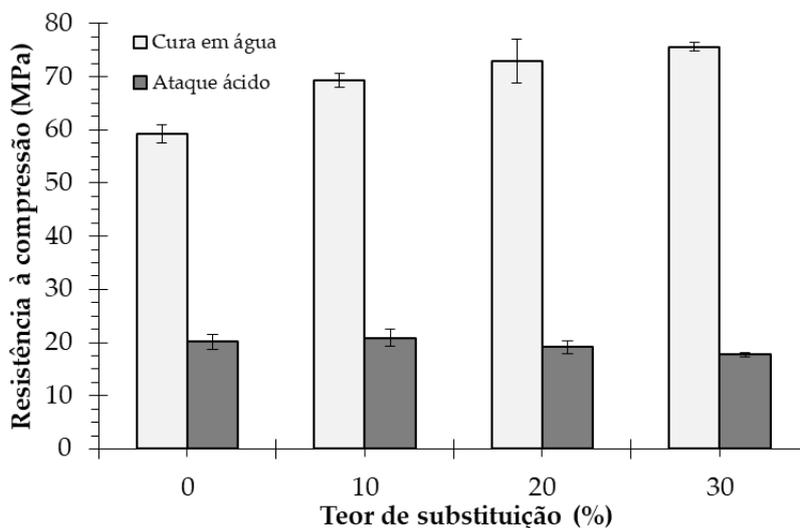
### 3.3 Resistência à compressão das argamassas

Os resultados de resistência à compressão das argamassas estão apresentados na Figura 4. A análise de variância ( $F_c = 43,84$ ;  $F_t = 4,07$ ;  $p < 0,05$ ) mostra que a resistência à compressão é significativamente influenciada pelo teor de substituição de cimento por DIAT60 para o grupo de argamassas submetidos à cura em água. Os maiores valores de resistência são alcançados pelas argamassas produzidas com a pozolana. O aumento da resistência à compressão de misturas com



diatomita pode ser atribuído à atividade pozolânica e aos efeitos físicos provocados pela inclusão dessa pozolana nas misturas <sup>(18)</sup>.

Figura 4 - Resistência à compressão das argamassas.



Como também mostra a Figura 4, após 63 dias de exposição ao ataque ácido, há uma redução da resistência mecânica das argamassas. Essa queda de resistência está diretamente associada à perda de massa sofrida pelas argamassas durante o ataque ácido, em decorrência das reações químicas que geram gipsita e etringita. A maior queda absoluta de resistência (76%) é observada na mistura com 30% de DIAT60. A mistura de referência, por outro lado, apresenta a menor redução de resistência (66%).

A menor perda de massa do M-DIAT60-30% não está associada a uma menor queda de resistência, como mostram as Figuras 2 e 4. Nesse sentido, torna-se importante destacar que as diferentes espessuras da camada degradada contribuem de forma significativa para os valores finais de resistência. Assim, pode-se inferir que a resistência das argamassas com DIAT60 sofrem maior queda em função da presença de área degradada maior nos corpos de prova. Ressalta-se que a região aderida ao corpo de prova não foi subtraída da área da seção transversal do corpo de prova para o cálculo da resistência à compressão. Outros autores também observaram as divergências entre os resultados de resistência à compressão e de perda de massa de misturas cimentícias submetidas ao ataque por ácido sulfúrico (SENHADJI *et al.*, 2014).

Embora a queda de resistência tenha sido mais pronunciada na mistura com maior teor de DIAT60, a análise de variância ( $F_c = 4,691$ ;  $F_t = 3,490$ ;  $p < 0,05$ ) e comparação múltipla de médias mostram que somente as misturas com 10 e 30% de DIAT60 apresentam valores de resistência



estatisticamente diferentes entre si. Dessa forma, é possível afirmar não há diferença significativa entres os valores de resistência alcançados pela mistura de referência e as misturas com diatomita após o ataque.

## 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados nesse estudo, pode-se concluir que:

- A diatomita estudada apresentou características químicas e físicas adequadas para utilização como adição pozolânica;
- O teor de substituição de cimento pela DIAT60 influenciou de forma significativa a resistência à compressão das argamassas. O melhor desempenho mecânico foi alcançado pela mistura com maior teor de pozolana (30%);
- Após o ataque por ácido sulfúrico, houve uma redução considerável dos valores de resistência à compressão das argamassas;
- Após exposição ao ácido, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os valores de resistência alcançados pela mistura de referência e as misturas com diatomita.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Além disso, os autores agradecem à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à CIEMIL, que forneceu a diatomita.

## 6. REFERÊNCIAS

1. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2016, 888 p.
2. ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (Eds.). Durabilidade do concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: **Ibracon**, 2014. p. 433-508.
3. MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolanitic and cementitious materials. 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p., 1996.



4. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 410-418, 2008.
5. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.
6. KASTIS, D.; KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; STAMATAKIS, M.G. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1821-1826, 2006.
7. ERGUN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 806-812, 2011.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requerimentos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2006.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.
12. SENHADJI, Y.; ESCADEILLAS, G.; MOULI, M., KHELAFI, H.; BENOSMAN. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. **Powder Technology**, v. 254, p. 314-323, 2014.
13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C109M-16A**: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50- mm] cube specimens). Philadelphia, 2016.
14. SANTOS, E. A.; MELO, M. A. F.; MELO, D. M. A.; FREITAS, J. C. O.; MARTINELLI, A. E. MELO, V. R. M.; MEDEIROS, R. L. B. A. Influência da adição de diatomita nas propriedades de pastas geopoliméricas: volume de filtrado, tempo de espessamento e resistência à compressão. **Cerâmica**, v. 61, p. 309-316, 2015.
15. YILMAZ, B.; EDIZ, N. The use of raw and calcined diatomite in cement production. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 202-211, 2008.
16. POSI, P.; LERTNIMOOLCHAI, S.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 896-901, 2013.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.
18. AHMADI, Z.; ESMAEILI, J.; KASAEI, J.; HAJIALIOGHLI, R. Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 16, p. 47-53, 2018.



# DOSAGEM DE CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE UTILIZANDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM PAVIMENTO FLEXÍVEL

Carlos Eduardo de Lima <sup>(1)</sup>; Enio Fernandes Amorim <sup>(2)</sup>;  
Hudson da Silva Oliveira <sup>(3)</sup>; Lucas Fernandes de Moura <sup>(4)</sup>;  
Valéria Gomes Álvares Pereira <sup>(5)</sup>

(1,2,3,4) IFRN – <sup>(1)</sup> carloselima@outlook.com; <sup>(2)</sup> enio.amorim@ifrn.edu.br; <sup>(3)</sup> Hudson\_ja@hotmail.com;  
<sup>(4)</sup> lucasfernandes1981@hotmail.com; Estácio – <sup>(5)</sup> valeriagapereira@gmail.com;

## RESUMO

A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em misturas para construção de pavimentos rodoviários é uma alternativa à redução do consumo de agregados naturais, destinando adequadamente esses substratos. Partindo desta premissa, nesta pesquisa foi analisado o emprego de RCD, nas frações de brita 1 e areia, em substituição aos seus pares naturais, na composição de um concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), para aplicação na capa de rolamento de pavimento flexível em rodovias. Foram produzidos dois traços do concreto (um convencional e outro com RCD), em quatro teores de ligante, entre 4,5% e 6,0%, comparando-se os parâmetros físicos e mecânicos entre ambos. Aplicaram-se os ensaios de rotina para os materiais e para as amostras das dosagens, utilizando-se o método Marshall. Os insumos reciclados mostraram menor densidade aparente, absorção expressivamente maior, resistência ao desgaste abrasivo próximo ao do natural, entre outros parâmetros atendeu aos limites exigidos para aplicação na destinação pretendida. Das análises dos traços produzidos, obtiveram-se resultados satisfatórios, atestando-se positivo o seu emprego na composição de CAUQ, resultando-se na execução de um trecho experimental em área urbana do município de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, porém a análise do comportamento do trecho não é contemplada neste trabalho.

**Palavras-chave:** Agregado reciclado. RCD. Pavimentação. Concreto asfáltico. CAUQ.

## DOSAGE OF ASPHALT CONCRETE USING CIVIL CONSTRUCTION WASTES IN ROAD PAVEMENT

### ABSTRACT

The utilization of construction and demolition wastes (CDW) in mixtures for construction of road pavements is an alternative to reduce the consumption of natural aggregates destining correctly those substrates. Sharing of these concerns, in this research was analyzed the usage of CDW, in fractions of gravel 1 and sand, in replacement to their natural similar, in the composition of an asphalt concrete, for application in the bearing layer of flexible pavement on roads. Were produced two concrete's mixtures (one conventional and another containing CDW), in four percentage of binder, between 4.5% and 6.0%, comparing the fisical and mechanical parameters between both. Were applied the tests of routine to the materials and to the dosages' samples, employing the performing Marshall. The recycleds input showed less apparent density, expressively over absorption, abrasion's test near the natural one, beyond others parameters, respecting the limits required to application on the intended destination. From reviews about the produced mixtures it was obtained satisfactory results, attesting positive the use of the recycled aggregates analyzed in the composition of asphalt concrete, resulting on the execution of an experimental highway stretch in urban area from Natal county, Rio Grande do Norte, Brazil, however the analyze about the stretch is not contemplated in this work.

**Key-words:** Recycled aggregate. CDW. Pavement. Asphalt concrete. Asphalt mixture.



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil promove a qualidade de vida das pessoas e incentiva o mercado movimentando sua economia. Este setor tem grande representatividade no processo de crescimento econômico e redução do desemprego, devido a sua capacidade de rapidamente gerar ocupações diretas e indiretas no mercado de trabalho e produz 50% dos resíduos sólidos urbanos no país (NETO, 2005)<sup>(1)</sup> e (ARAÚJO *et al.*, 2006)<sup>(2)</sup>.

No Brasil, os dados mais recentes sobre a geração de RCD, publicados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018)<sup>(3)</sup> apontam nos seus últimos dez boletins (de 2008 à 2017) que a coleta de RCD cresceu de 29 milhões de toneladas para 45 milhões, enquanto que só na região Nordeste as coletas saltaram de 5,0 milhões de toneladas para 9,0 mi. A mesma associação relata que, dentre a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), a parcela de RCD é a única com registros confiáveis.

Um dos setores de engenharia que pode promover o uso de agregados reciclados (AR) que requerem menos investimento são os pavimentos urbanos e rodoviários (REZENDE *et al.*, 2015)<sup>(4)</sup>. Esse produto é usado em sua grande parte como material de base em estradas (TABSH; ABDELFAH, 2009)<sup>(5)</sup>. Contudo, os parâmetros físicos e a composição desses agregados reciclados variam de acordo com sua localização e este fator implica na qualidade do subproduto, no qual certamente influenciará em suas propriedades mecânicas.

Consubstanciado nestes aspectos, este trabalho apresenta uma proposta de aplicação de RCD como agregados reciclados na fabricação de revestimento de pavimento asfáltico, em alternativa ao aproveitamento destes materiais e substituindo os rochosos naturais, do qual o setor da pavimentação é responsável por 18,37% do consumo de rocha britada no país, segundo estatísticas do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2009)<sup>(6)</sup>.

A princípio, foram realizados estudos de caracterização dos materiais, em seguida se procedeu a confecção de dois traços do concreto, sendo um com agregados naturais e outro contendo brita 1 e areia reciclados em substituição dos seus similares. Cujas análises das propriedades físicas e mecânicas, resultaram na execução de um trecho experimental liberado para o tráfego de veículos em área urbana do município de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo consiste na análise da viabilidade do uso de agregados reciclados provenientes de obras civis de construção e demolição do município de Natal-RN, em alternativa ao emprego de agregados convencionais para produção de CAUQ utilizado em serviços de pavimentação rodoviária na camada de rolamento. Por tanto, procedeu-se inicialmente a caracterização dos insumos e posteriormente a dosagem de dois traços de concreto asfáltico, sendo um com agregados naturais e outro empregando RCD. Foram moldados doze corpos de prova em quatro percentuais diferentes de CAP 50/70 (três determinações por teor de ligante), empregando-se o método de compactação Marshall, e realizadas análises comparativas do comportamento físico e mecânico entre estes, submetendo-os às mesmas condições ambientais, de operação e de infraestrutura. Ao final, os estudos proporcionaram a execução de um trecho experimental, com o traço contendo RCD, porém não fazendo parte desta pesquisa as análises sobre o comportamento do pavimento executado. Os materiais objetos de estudo nesta campanha são mencionados no tópico a seguir. As dosagens foram trabalhadas por meio do método Marshall.

### 2.1. Materiais

Utilizaram-se agregados naturais comercialmente denominados de brita 1 (um) e 0 (zero) ou pedrisco, com diâmetros característicos entre 19,0mm e 9,5mm e entre 9,5mm e 4,8mm, respectivamente; pó de brita (pdb) com diâmetro menor que 4,8mm, todos de rocha granítica, oriundos de jazida da região metropolitana da grande Natal-RN; areia lavada de rio e Cimento Portland utilizado como filer (material de preenchimento) não importando sua função estrutural, uma vez que este atua como material inerte na composição.

Os agregados reciclados de concreto (ARC), por conterem em sua composição mais de 90% de resíduos de concreto, argamassa e materiais pétreos, são considerados mais nobres e homogêneo, em detrimento aos agregados reciclados mistos (ARM) (GRUBBA; PARREIRA, 2009)<sup>(7)</sup>. O agregado graúdo reciclado, na fração de brita 1 foi do tipo ARM e também se utilizou areia reciclada, ambos fornecidos por uma usina de processamento, do Grupo Duarte, localizada na região da grande Natal-RN, que atua na coleta e usinagem de resíduos de obras civis.

O ligante utilizado neste projeto de pesquisa foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70, proveniente de refinarias do estado do Ceará, Brasil, fornecido pela empresa TCPav (Tecnologia em Construções e Pavimentação) localizada próximo a Natal-RN, e cuja foi posteriormente executora do



trecho experimental. O referido tipo de asfalto é carro-chefe empregado na região em que se desenvolveu este estudo, nas obras de pavimento flexível com CAUQ.

O concreto asfáltico usinado a quente é a mistura asfáltica mais empregada no Brasil, em termos de execução de pavimentos de rodovias, conhecido pela sigla CAUQ, ou CBUQ (concreto betuminoso), tratando-se de uma mistura usinada, convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos (gráudo, miúdo e material de enchimento) e cimento asfáltico de petróleo, ambos aquecidos em temperatura pré-determinada, decorrente do ensaio de viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2010)<sup>(8)</sup>. Quanto a granulometria dos agregados, as dosagens foram enquadrada na faixa “C” padrão DNIT, dosada para aplicação na camada de rolamento do trecho experimental, em atenção a norma técnica DNIT 031-ES (DNIT, 2006)<sup>(9)</sup>. A seguir é apresentada a relação das normas aplicadas na etapa de caracterização (Tabela 1), às quais os métodos e as especificações estão submetidos.

Tabela 1 - Quadro de normas aplicadas aos ensaios de caracterização.

Material	Ensaio	Norma
Agregados graúdo e miúdo (natural e reciclado) e fíler	Classificação de resíduos	Resolução nº 307 (CONAMA, 2002) <sup>(10)</sup>
	Coleta dos agregados (procedimentos)	DNER-PRO 120 (DNIT, 1997) <sup>(11)</sup>
	Granulometria por peneiramento	DNER-TER 403 (DNIT, 2000) <sup>(12)</sup>
		DNER-ME 083 (DNIT, 1998) <sup>(13)</sup>
	Índice de Forma (método crivo)	DNER-ME 086 (DNIT, 1994) <sup>(14)</sup>
	Densidade e absorção por água	DNER-ME 081 (DNIT, 1998) <sup>(15)</sup>
	Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035 (DNER, 1998) <sup>(16)</sup>
	Massa específica da areia (frasco de <i>Chapman</i> )	DNER-ME 194 (DNIT, 1998) <sup>(17)</sup>
	Massa específica do Cimento Portland (frasco de <i>Le Chatelier</i> )	DNER-ME 085 (DNIT, 1994) <sup>(18)</sup>
	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70	Especificação de material
Densidade de materiais betuminosos		DNER-ME 193 (DNIT, 1996) <sup>(21)</sup>
Ponto de fulgor		DNER-ME 148 (DNIT, 1994) <sup>(22)</sup>
Ponto de amolecimento – Anel e bola		DNIT 131-ME (DNIT, 2010) <sup>(23)</sup>
Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>		DNER-ME 004 (DNIT, 1994) <sup>(24)</sup>
Determinação da Penetração		DNIT 155-ME (DNIT, 2010) <sup>(25)</sup>



## 2.2. Métodos

Os agregados graúdos e miúdos foram coletados, do pátio da TCPav, em três sacos de nylon, com aproximadamente 20,0 Kg de cada tipo de material, cuidando-se para não haver perda de finos possivelmente presente nas amostras. Do Cimento Portland foi coletado cerca e 5,0 Kg e o CAP 50/70 foi recolhido e transportado em um galão metálico pesando aproximadamente 18 Kg. As quantidades descritas acima se mostraram suficientes para a realização das análises e eventual repetição de um ou mais ensaios.

Planejou-se a sequência dos ensaios de caracterização, das frações graúdas, iniciando-se pelos não destrutivos e finalizando com os quais previam-se perda e descarte de material. Procedeu-se à análise da composição gravimétrica do RCD pelo método da seleção manual do tipo de material constituinte em três amostras de 500g cada, obtidas por meio de equipamento repartidor para redução de amostra. Este ensaio se deu de modo descritivo pelo método quantitativo, consistindo-se em separar manualmente os materiais percebidos em cada porção, sendo classificados em resíduos de concreto (contendo fragmentos de argamassa de Cimento Portland e rocha granítica), materiais cerâmicos (os provenientes de telhas e blocos de cerâmica vermelha), resíduos de pisos (compostos por fragmentos de placas de revestimento cerâmico) e materiais indesejáveis (aqueles não enquadrados nas classificações anteriores); seguindo-se da análise granulométrica por peneiramento manual, tanto para as frações graúdas quanto miúdas, empregando-se o conjunto de peneiras da série normal, conforme as normas para este processo descritas na Tabela 1.

Na sequência, realizou-se a verificação do índice de forma pelo método crivo na graduação “C”, determinada após o ensaio de granulometria, conforme tabela anexa na norma para este ensaio; aferiu-se a densidade aparente e absorção por água dos agregados graúdos e finalizando as caracterizações, dessa parcela, pelo ensaio de Abrasão *Los Angeles*, aplicando a graduação “B” da tabela 1 da sua norma. Os ensaios acima citados foram repetidos para duas amostras, com exceção da primeira caracterização relatada, onde analisaram-se três determinações. Quanto a observação da densidade das areias e o pdb, aplicou-se o método do frasco de *Chapman* com água destilada. Para o filer, foi utilizado o frasco de *Le Chatelier* com querosene, conforme as normas relacionadas na tabela 1.

Para o CAP 50/70, a verificação da densidade foi procedida em duas amostras, utilizando dois frascos de vidro com capacidade para 50 ml (mililitros) cada, água destilada e balança eletrônica com precisão de 0,01g. Também se procedeu a verificação ponto de fulgor. Analisou-se ainda o ponto de



amolecimento do ligante, pelo método do “Anel e Bola”. No ensaio de verificação da viscosidade, empregou-se o método segundo *Saybolt-Furol*, utilizando parêmetro viscosímetro calibrado nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, respectivamente. E, por último, realizou-se a determinação da penetração do asfalto na condição semissólida. Todos os ensaios deram-se em temperatura ambiente de 25°C, controlados por termômetros analógicos e cronômetro digital.

O engenheiro norte-americano, Bruce Marshall, desenvolveu na década de 1930 a metodologia que leva o seu nome e cuja foi a utilizada no procedimento de dosagem das misturas nos traços de CAUQ desta pesquisa, por ser o método executivo mais empregado atualmente no Brasil, quando se fala em produção de pavimentação flexível, se tratando de um recurso prático e simplista. “Diante disso, a caracterização das misturas requer um balanço apropriado entre rigor e praticidade, uma vez que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente, pelo menos não no estágio atual de conhecimento” (BERNUCCI *et al.*, 2010)<sup>(26)</sup>.

Para efeito de análise dos resultados, foram estabelecidos dois traços de concreto asfáltico, conforme já citado ao longo do artigo, sendo um traço convencional – TAN (traço com agregados naturais) e outro substituindo a brita 1 e a areia naturais por agregados reciclados de RCD – TAR (traço com agregados reciclados). A Tabela 2 a seguir relaciona as normas trabalhadas na etapa das dosagens.

Tabela 2 - Quadro de normas empregadas no estudo das dosagens.

Processo	Norma	Descrição
Dosagem Marshall	DNER-ME 043 (DNIT, 1995) <sup>(27)</sup>	Método de Ensaio
Enquadramento de faixa e análise dos parâmetros	DNIT 031-ES (DNIT, 2006) <sup>(9)</sup>	Especificação de serviço

As dosagens trabalhadas visaram atender as especificações da norma técnica pertinente, para constituir uma camada de rolamento em pavimento flexível de rodovia em trecho urbano. Para tanto, procedeu-se ao enquadramento na faixa “C” em ambos os traços, trabalhando-se com as porcentagens de ligante em 4,50%, 5,0%, 5,50% e 6,0% (intervalo habitual empregado na região deste trabalho), confeccionando-se três corpos de prova (CPs) para cada teor de CAP, aplicando-lhes 75 golpes por face, utilizando um soquete de 5,0 Kg como energia de compactação, em simulação de alto volume de tráfego. Na sequência, executaram-se os ensaios de caracterização das 12 (doze) peças moldadas, verificando a densidade, estabilidade, volume de vazios e a relação de vazios dos agregados preenchidos pelo ligante.

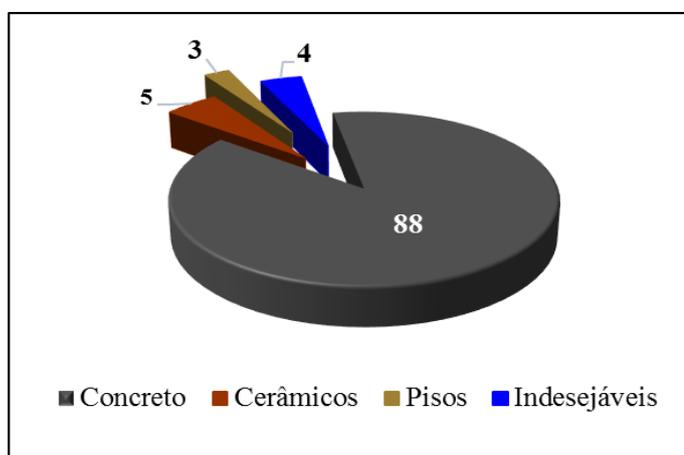


### 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1. Caracterização dos agregados

Quanto a composição gravimétrica das três amostras observadas, os dados apontaram se tratar de ARM, conforme as classificações da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002)<sup>(10)</sup>, na categoria A.. Contudo, apresentou 88,25% de material cimentício e pétreo, valor bem próximo ao limite inferior de 90% da classificação como ARC. O que indica um material de boa qualidade na resistência à compressão, conforme é representado na Figura 1 a seguir.

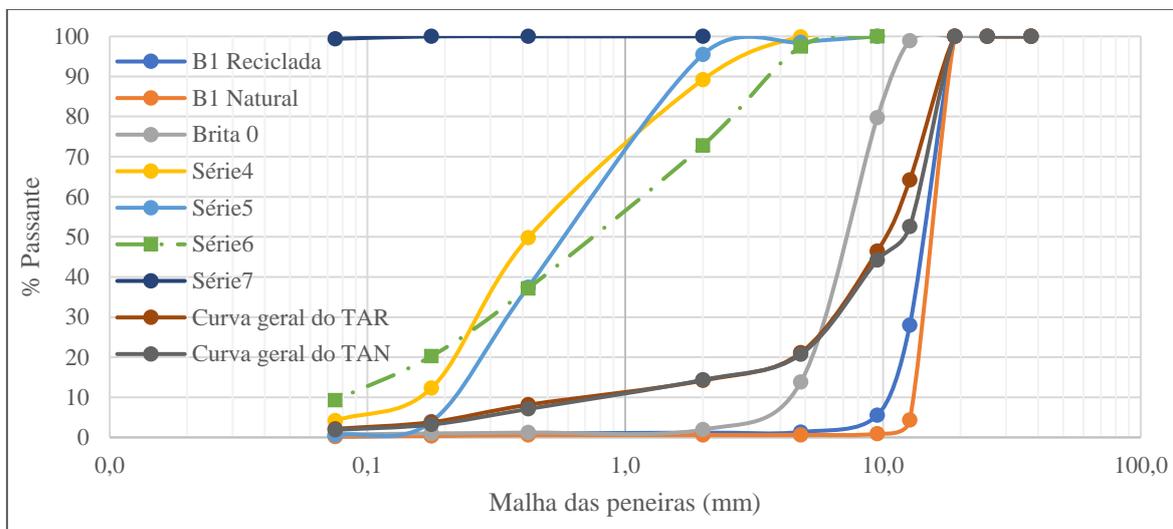
Figura 1 - Composição gravimétrica das amostras: concreto; cerâmico; pisos; e indesejáveis.



Da análise granulométrica, constatou-se a quase ausência de filer nos agregados graúdos de RCD e natural, ao passo que a areia reciclada registrou quantidade em massa significativa de material fino nas amostras, o que pode levar a um aumento na quantidade necessária de CAP. As britas 1 (19,0 mm) e a brita 0 (9,5 mm) expressaram curvas de graduação aberta. As areias natural e reciclada, revelaram graduação densa ou bem-graduada, com distribuição de granulometria contínua, sendo a mesma classificação para o pó de brita, no entanto, se observando grande quantidade de material pulverulento neste. Quanto ao cimento Portland, obteve-se quantidade irrelevante de material retido na peneira 0,075mm e, devido as características apresentadas pelos agregados miúdos citadas acima, o uso do filer foi compensado pela quantidade de finos presentes na areia reciclada e no pdb. Por fim, também se encontram plotadas, entre o conjunto, as curvas com a granulometria geral de ambos os traços, onde se observa pequena variação na peneira de 12,7mm de 11% entre elas, sendo o traço com agregados reciclados mostrando 11,8% a mais de material retido nesta malha, entretanto, mantiveram-se praticamente sobrepostas. A Figura 2 a seguir contempla as informações acima descritas.



Figura 2 - Curvas da análise granulométrica dos agregados.



Nas análises da densidade aparente dos materiais, de modo esperado, pode-se aferir um menor valor para os materiais reciclados em relação aos naturais correspondentes, uma vez que as britas e o pdb são oriundos de rocha granítica, ao passo que os agregados reciclados apresentaram composição heterogênea. Na verificação da absorção por água da brita 1, se obteve um valor de 0,6% no agregado natural e um valor dez vezes superior (6,2%) para o reciclado, constatando-se tratar de um material mais poroso e menos consolidado que o primeiro, além do fato que as amostras apresentaram frações de cerâmica vermelha (que contem argila) e pequena quantidade de gesso, o que faz reduzir a densidade e pode levar a um pequeno aumento no consumo de CAP. Os parâmetros do índice de forma e do desgaste abrasivo do RCD graúdo apontaram valores ligeiramente abaixo da brita 1 natural, contudo, sendo classificados como de boa qualidade, atendendo aos requisitos das respectivas normas DNIT-ES 031 (DNIT, 2006)<sup>(9)</sup> e DNER-ME 035 (DNER, 1998)<sup>(16)</sup>, cujos resultados estão resumidos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Caracterização quanto a densidade e absorção dos agregados.

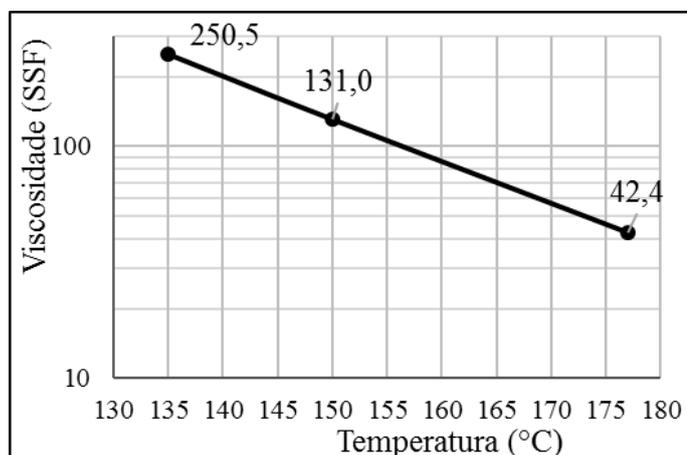
Material	Densidade	Absorção	Índice de forma	Los Angeles
Brita 1 natural	2,59	0,6 %	0,92	31 %
Brita 1 de RCD	2,19	6,2 %	0,87	35 %
Brita 0	2,56	-	-	-
Pó de brita (pdb)	2,63	-	-	-
Areia natural	2,61	-	-	-
Areia de RCD	2,54	-	-	-
Cimento Portland	2,86	-	-	-



### 3.2. Caracterização do cimento asfáltico

Das análises do CAP 50/70 ensaiado aferiu-se uma densidade igual a 1,01; o ponto de fulgor, em função da segurança dos operadores e do equipamento empregado no estudo, a operação foi interrompida ao atingir a temperatura de 225 °C, uma vez que esta já atende ao limite de operação do material na confecção do CAUQ (devido ocorrer a quebra das moléculas do ligante aos 177 °C) não se tendo atingido os pontos de fulgor nem de combustão na ocasião. Na verificação da viscosidade segundo o método *Saybolt-Furol*, obteve-se como resultado o gráfico ilustrado na Figura 3 abaixo, cujo instrumento revelou como temperaturas de trabalho do CAP em 160 °C e de aquecimento dos agregados de 170 °C a 175°C.

Figura 3 - Curva de viscosidade segundo Saybolt-Furol.



O mesmo material apresentou ponto de amolecimento à temperatura média de 44,5 °C e do ensaio de penetração se obteve um resultado de 53, bem próximo ao limite inferior da sua especificação (50/70 – valores da penetração mínima e máxima, respectivamente, do CAP em questão). Tendo em vista que todos os parâmetros verificados mantiveram-se enquadrados entre os limites de aprovação solicitados pela norma DNIT 095-EM (DNIT, 2006)<sup>(20)</sup>, o cimento asfáltico também se mostrou aprovado para uso e aplicação.

### 3.3. Caracterização das dosagens

Mediante análise granulométrica e o enquadramento na faixa “C” padrão DNIT, conforme DNIT 031-ES (DNIT, 2006)<sup>(9)</sup>, a Tabela 4 a seguir apresenta a composição para um traço, denominado por TAN, com agregados convencionais e outro, denominado por TAR, contendo os agregados reciclados.



Tabela 4 - Percentuais de agregados utilizados nas dosagens de CAUQ.

Agregados	TAN	Agregados	TAR
Brita 1 natural	10,0%	Brita 1 RCD	13,0%
Brita 0	40,0%	Brita 0	40,0%
Pó de brita	29,0%	Pó de brita	25,0%
Areia de natural	18,0%	Areia de RCD	20,0%
Cimento Portland	3,0%	Cimento Portland	2,0%

Nos estudos dos parâmetros volumétricos e mecânicos entre os doze corpos de prova confeccionados, analisaram-se os dados da massa específica aparente média (Gmb), sendo adotado o percentual de CAP para o maior valor observado neste critério, tendo o TAN apontado seu melhor desempenho aos 5,5% de ligante, ao passo que o TAR expressou curva ascendente, indicando o teor de 6,0% (Figura 4, abaixo) e a posição das curvas era esperada em função dos resultados da massa específica dos materiais. Quanto a análise do volume de vazios (Vv - %), é feita a relação entre a densidade máxima teórica – DMT e o Gmb, tomando-se os valores entre 3,0% e 5,0%. Para o Vv, nota-se que a mistura convencional apontou na composição com 4,5% de asfalto valor de apenas 3,43% de vazios, diminuindo a medida em que aumentou a quantidade de CAP, ao passo que o composto contendo RCD obteve a taxa de 4,7% de ligante, enquadrada na faixa limitada pela norma de referência, conforme se observa na Figura 5. Nesta análise, é perceptível que a mistura TAR apresenta naturalmente maior porosidade, possivelmente em decorrência da diversidade de materiais contidos no RCD, conforme apontado nos resultados da composição gravimétrica.

Figura 4 - Relação Gmb - CAP.

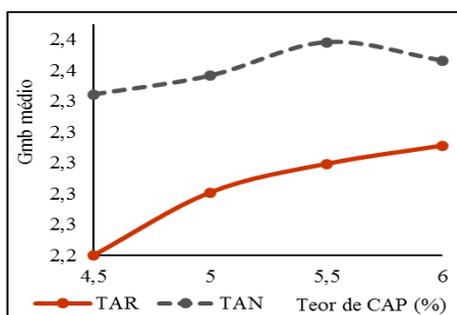
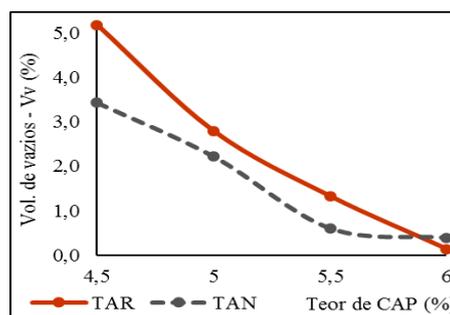


Figura 5 - Relação Vv - CAP.



Também se observou a relação da quantidade de betume com o percentual de vazios (RBV - %), indicando o quanto de vazios dos agregados é preenchida por CAP. Neste fator, é obtido o teor de cimento asfáltico da mistura que estiver entre os limites de 75% a 82%. Dos traços estudados na pesquisa, foi estabelecido o percentual de 4,5% de ligante no traço natural, visto que este obteve um RBV de 75,11% enquanto que a dosagem com 5,0% de CAP ficou acima do limite superior (RBV igual



a 83,88%). Para o traço com RCD, o melhor RBV (80,02%) se deu no segundo teor de ligante, estando o anterior e os posteriores fora da faixa normatizada, assim como é apresentado na Figura 6.

E, por último, verificou-se o critério da estabilidade Marshall ( $E - Kgf$ ) versus ligante, que determina a carga máxima a qual a massa asfáltica pode suportar, quando submetida à compressão radial semi confinada, e desta observação retira-se o percentual de asfalto que apresenta maior valor, sendo o mínimo aceito por norma de 500  $Kgf$ , para 75 golpes. Na Figura 7 abaixo, que traz os gráficos deste parâmetro, se percebeu com grande surpresa o resultado das análises, devido a curva do TAR expressar valores com praticamente o dobro dos obtidos com o TAN. Acredita-se que, mesmo com os materiais naturais e o traço somente desses agregados apontando massa específica maior em detrimento dos seus pares reciclados, a dosagem com RCD, além de ter na sua composição materiais pétreos (graníticos), também contém material oriundo de concreto já consolidado (com o devido ganho de resistência inicial) envolvendo as britas constituintes. Este fator pode ter conferido ganho de estabilidade quando submetido ao ensaio de compressão por meio de prensa Marshall e esta é uma premissa possível de ser observada nos resultados do desgaste à abrasão Los Angeles que mostrou valor próximo ao da brita natural.

Figura 6 - Relação RBV - CAP.

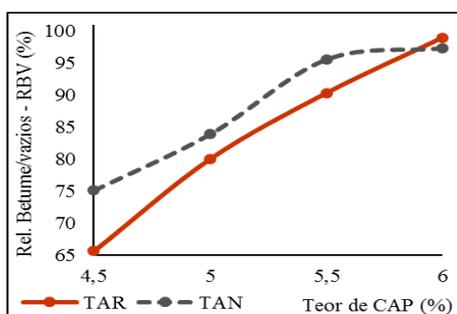
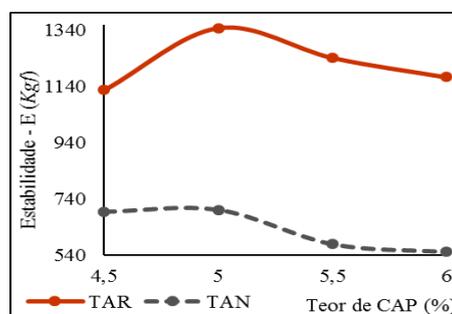


Figura 7 - Relação Estabilidade - CAP.



Motter (2013)<sup>(28)</sup>, que estudou as propriedades de um concreto betuminosos usinado a quente, aplicando agregado graúdo reciclado de concreto em várias misturas, também obteve valores da estabilidade semelhantes para 6,0% de CAP. Nestas análises, verifica-se que o melhor ganho de resistência se deu na dosagem de 5,0% de ligante em ambos os traços. No TAN se anotou estabilidade de 700,11  $Kgf$  e no TAR foi percebido o valor de 1.347,88  $Kgf$ , salientando-se que todas as amostras se mantiveram acima do limite aceitável.

Diante das análises dos quatro parâmetros acima relacionados, se obteve as porcentagens de 4,9%  $\pm 0,3$  de ligante para o traço com agregados convencionais e 5,2%  $\pm 0,3$ , para a confecção do traço



de CAUQ empregando RCD, mostrando uma dosagem praticamente equivalente entre os dois, considerando-se as aproximações. A Tabela 5 abaixo traz, em resumo, esses apontamentos.

Tabela 5 - Resumo de cálculo do teor ideal de asfalto.

Tipo do traço	Parâmetros considerados				Teor ótimo ± 0,3
	Gmb	Vv (%)	RBV (%)	Estabil. (Kgf)	
TAN	5,5	4,5	4,5	5,0	4,9
TAR	6,0	4,7	5,0	5,0	5,2

Conforme já foi antecipado no início deste artigo, esta pesquisa ultrapassou os limites do campo acadêmico, ganhando aplicação prática do CAUQ com RCD na composição, ao ser executado um trecho experimental real de pavimentação asfáltica. Tendo sido contemplada a rua José Miranda da Silva, no bairro Brasil Novo, localizado na zona norte do município do Natal-RN, com aproximadamente 100 metros de extensão de pavimento aplicado. No entanto, não é contemplado neste trabalho o acompanhamento e análises sobre o seu desempenho in loco, cabendo esta tarefa a outra equipe de estudos.

#### 4. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve o objetivo primário de propor a aplicação de resíduos advindos de obras civis de construção e demolição, aqui denominados por RCD, nas frações de brita 1 e areia na composição de um concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), empregado na camada de rolamento em pavimento flexível de rodovias, em alternativa ao uso de insumos naturais e destinação adequada dos mesmos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais na busca de verificar seu potencial uso nesta aplicação e, uma vez que esses agregados reciclados obtiveram resultados próximos aos dos seus pares naturais comparados, se mostrou plenas condições para composição da mistura asfáltica usinada a quente.

Das quatro variáveis analisadas para obtenção do melhor teor de ligante de projeto (Gmb, Vv, RBV e Estabilidade), todos tiveram valores adequados aos limites normatizados, sendo extraído o teor de CAP 50/70 calculado para determinação da melhor mistura em ambos os traços praticamente equivalentes, reforçando a viabilidade de aplicação de RCD em concreto asfáltico nos moldes da pesquisa.



Considera-se que os resíduos da construção civil são sazonais, dependendo dos tipos de edificações erguidas ou demolidas. É diversificado quanto à localidade de sua produção, ao passo que a qualidade dos materiais utilizados nas obras muda conforme as tecnologias disponíveis e as peculiaridades dos insumos de cada região.

É válido concluir que, ao compartilhar das preocupações com a sustentabilidade do planeta, é possível buscar alternativas palpáveis e sumariamente aplicáveis que visem diminuir a degradação indiscriminada dos recursos naturais não renováveis, fazendo-se o reuso de materiais. A engenharia civil deve continuar construindo suas obras de arte, não destruindo o planeta, mas o tendo como um aliado.

## 5. REFERÊNCIAS

1. NETO, J. DA C. M. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. p. 162, 2005.
2. ARAÚJO, N. M. C. de; NÓBREGA, C. C.; MEIRA, A. R.; MEIRA, G. R.; **Gestão para os Resíduos de Construção e Demolição (RCDs): uma proposta para a grande João Pessoa (Paraíba – Brasil)**. XII Silubesa, n. 1, p. 11, 2006.
3. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. ABRELPE, São Paulo, 2018. Disponível em: <[www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2018.pdf](http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2018.pdf)>
4. REZENDE, L. R.; MARQUES, M. O.; OLIVEIRA, J. C.; CARVALHO, J. C.; GUIMARÃES, R. C.; RESPLANDES, H. M. S.; COSTA, L. C. S. **Field Investigation of Mechanic Properties of Recycled CDW for Asphalt Pavement Layers**. J. Mater. Civ. Eng. 2016.
5. TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. **Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, 2009.
6. DNPM. - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral Do Brasil**. DNPM, v. 70.041.903, p. 32. Brasília, 2009.
7. GRUBBA, D. C. R. P.; PARREIRA, A. B. **Emprego de agregado reciclado de concreto em camadas de base e sub-base de pavimentos**. EESC-USP, 2009.
8. BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.; **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros - 3: Agregados**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
9. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNIT 031 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.
10. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - Ministério do Meio Ambiente, Governo Federal, Brasil. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**. Brasília – DF, 2002.
11. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-PRO 120: Coleta de amostras de agregados**. Rio de Janeiro, 1997. 05 p.



12. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-TER 403: Peneiras de ensaio e ensaio de peneiramento - terminologia.** Rio de Janeiro, 2000. 07 p.
13. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 083: Agregados - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998. 05 p.
14. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 086: Agregado - Determinação do índice de forma - Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1994. 05 p.
15. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 081: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1998. 06p.
16. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 035: Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles".** Rio de Janeiro, 2006. 14 p.
17. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 194: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1998. 04 p.
18. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 085: Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real.** Rio de Janeiro, 1994. 04 p.
19. ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Resolução Ranp nº 19 - 2005: Especificações do Cimento Asfáltico de Petróleo.** Rio de Janeiro, 2005.
20. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNIT 095 - EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material.** Rio de Janeiro, 2006. 06 p.
21. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 193: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e massa específica.** Rio de Janeiro, 1996. 06 p.
22. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 148: Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland).** Rio de Janeiro, 1994. 02 p.
23. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNIT 131 - ME: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010. 06 p.
24. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 004: Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura.** Rio de Janeiro, 1994. 02 p.
25. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNIT 155 - ME: Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2010. 07 p
26. BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.; Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros - 6: Propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
27. DNIT. - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. **DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995. 11 p.
28. MOTTER, J. S. **Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto.** Dissertação (mestrado em engenharia de construção civil) – Universidade Federal do Paraná, Paraná/PR, 2013. 260 p.



## ANÁLISE DA CADEIA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL DE FORTALEZA

Denise Alves Leal <sup>(1)</sup>; Vanessa Ribeiro Campos <sup>(2)</sup>

(1) UFC – denisealvesleal1@gmail.com; (2) UFC – vanessa.campos@ufc.br

### RESUMO

Esse estudo buscou mapear o fluxo de processos do RCC desde a geração até a reinserção no mercado ou disposição final. A metodologia da pesquisa se pautou na realização de entrevistas semiestruturadas com representantes do setor público e privado do processo de gerenciamento de RCC. A pesquisa contribuiu para a caracterização das atividades individuais e coletivas de empresas locais envolvidas na logística reversa do RCC e dos intervenientes do processo, além da listagem dos seus principais entraves. Conclui-se que existe a necessidade de maior conscientização dos *stakeholders* (principalmente as construtoras), desburocratização para implantação de usinas de reciclagem, desenvolvimento de técnicas para tratamento de outros materiais como o gesso e a madeira, incentivos para os produtores e compradores de produtos reciclados, maior fiscalização da triagem, transporte e destinação final do RCC. O estudo da logística reversa do RCC se faz necessário para a criação de novos planos de ação, políticas de incentivos, leis e aplicação de sanções que permitam o avanço da atuação sustentável.

**Palavras-chave:** Gerenciamento do RCC. Logística Reversa. Sustentabilidade.

## CIVIL CONSTRUCTION WASTE CHAIN ANALYSIS IN FORTALEZA

### ABSTRACT

This study sought to map the flow of CDW processes from generation to reinsertion in the market or final disposal. The research methodology was based on semi-structured interviews with public and private sector representatives of the CDW management process. The research contributed to the characterization of the individual and collective activities of local companies involved in the reverse logistics of the CDW and of the stakeholders of the process, in addition to listing its main obstacles. It is concluded that there is a need for greater awareness of stakeholders (mainly construction companies), reduction of bureaucracy for the implementation of recycling plants, development of techniques to treat other materials such as gypsum and wood, incentives for producers and purchasers of recycled products, greater supervision of the sorting, transportation and final destination of the CDW. The study of CDW reverse logistics is necessary for the creation of new action plans, incentive policies, laws and application of sanctions that allow the advance of sustainable performance.

**Key-words:** Management. Reverse logistic. Sustainability.



## **1. INTRODUCTION**

Currently, the Construction Industry is among the main causes of environmental impacts, not only due to the consumption of natural resources in its production chain, but also due to the indiscriminate disposal of construction and demolition wastes (CDW)<sup>(1)</sup>. The CDW not only represents the largest share of solid waste existing in urban áreas<sup>(2)</sup> but also makes construction industry the largest contributor to landfill growth<sup>(3)</sup>.

Increasing pressure to improve quality, productivity, efficiency, effectiveness and sustainable development has guided the new behavior of construction companies<sup>(4)</sup>. Therefore, it is crucial the study of the reverse distribution channels, also known as reverse logistics, which deal with actions ranging from the reduction of raw materials used to the correct destination of products, materials and packaging<sup>(5)</sup>.

This research aims to propose improvements to the CDW reverse logistics process through the analysis of the waste generation chain in Fortaleza, Ceará. It is important to emphasize that this study does not focus on the chemical analysis of materials, their reactions or technological innovations. Nor is it intended to investigate the details of the material life cycle. Its approach is focused on aspects of reverse logistics, through the study of several stakeholders in the Metropolitan Region of Fortaleza.

## **2. SUSTAINABILITY IN CONSTRUCTION INDUSTRY**

Over the last decades, it has been noted that economic and production systems cannot be separated from environmental aspects. Increased awareness about sustainability has become a priority in the design and operation of supply chains<sup>(6)</sup>. Green supply chain management practices, such as reverse logistics, ensure that environmental and ecological objectives are aligned with the chain's operational objectives<sup>(7)</sup>.

Considering that the construction industry is able to absorb almost all its residues<sup>(1)</sup>, the Resolution of the National Environmental Council (CONAMA) No. 307 was implemented with the purpose of facilitating the reuse of waste through the use of a classification according to the CDW reuse or recycling capacity<sup>(8)</sup>. This resolution was further supported by the approval of the Solid Waste National Policy (SWNP)<sup>(9)</sup>, which establishes guidelines for the integrated management of solid waste to generators, public authorities and economic instruments<sup>(10)</sup>.

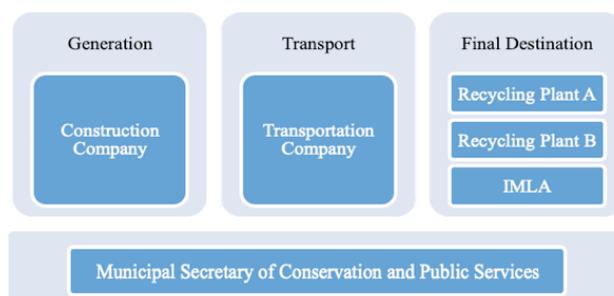


With respect to the waste reuse capacity, there are several possibilities of using CDW components as filler, sub-base of highways, insulation products, among others<sup>(11)</sup>. In accordance with studies carried out by ABRECON<sup>(9)</sup>, the main causes of the difficulty in the sale of recycled products are the lack of legislation to encourage consumption, a lack of knowledge by the Market and a low waste quality. As a result, most of the CDW is still sent to landfills, reused or cremated precariously<sup>(19)</sup>.

### 3. METHODOLOGY

This research focuses on the analysis of the individual and collective activities of the CDW 's reverse logistics in Fortaleza – Ceará, aiming to describe all phases and members from generation to reuse and reinsertion of the waste into the construction industry. Public and private sector representatives from the CDW management process were interviewed (Figure 1). To do so, the methodology involved a construction company, two recycling plants, an inert material landfill area (IMLA), a transportation company and the Municipal Secretary of Conservation and Public Services (MSCPS).

Figure 1 – Research participants



The stakeholder research was conducted through the application of semi-structured interviews, composed by legal questions, logistics and financial. The data were treated and concatenated, giving rise to information such as the characterization of each participating company, the main CDW components generated in Fortaleza, the description of the entire reverse process, as well as the main difficulties of each participant.

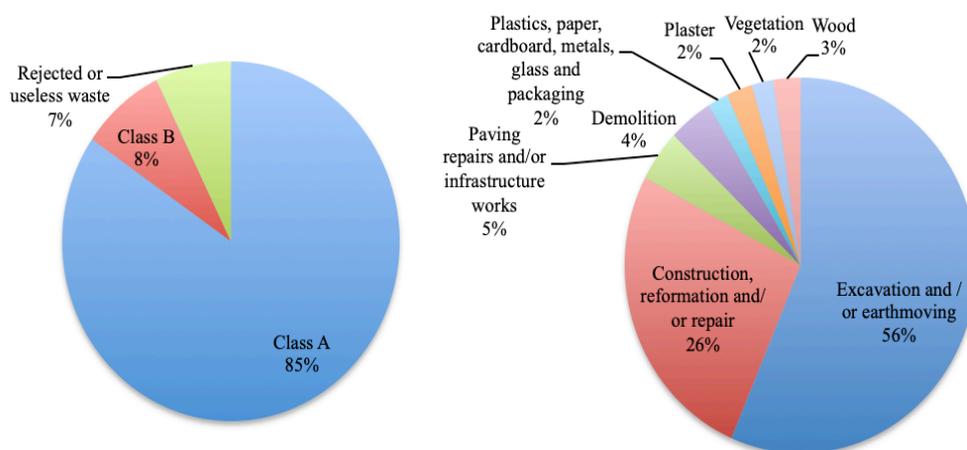


## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1. Characterization of the CDW production chain actors of Fortaleza

The waste generators are firms responsible for activities or businesses that generate CDW. According to the construction company, the Civil Construction Waste Management Plan (CCWMP), required by the Law No. 12.305<sup>(13)</sup>, is the main step taken by the company to properly manage the CDW. Through this plan, many actions that will guide the management of waste throughout the execution of the work are defined, such as environmental awareness.

Figure 2 – Class and composition percentage of reusable waste (classes A and B) of Fortaleza 2016 - 2018



According to <sup>(14)</sup>, the CDW average volume generated monthly in the city has been relatively stable in between 2016 and 2018. Regarding the percentage of waste generated by class between these years (Figure 2), the same data suggest that of all the CDW produced in Fortaleza, 85% correspond to class A materials and 8% correspond to class B materials. Considering only the reusable residues, 56% of its composition corresponds to sandy materials resulting from the preparation and excavation of land and 26% of ceramic components, mortar and concrete. This information corroborates with researches related to the composition of CDW in the country<sup>(15)</sup> and reveals a pattern for buildings based on the use of concrete and ceramic.

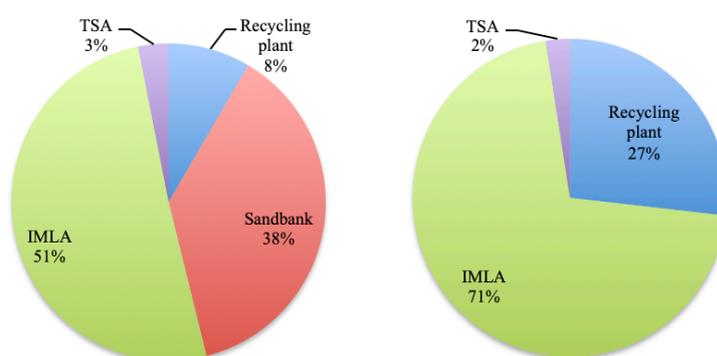
The conveyors correspond to the companies responsible for collecting and transporting the waste. In order to transport the CDW, the company interviewed uses multicranes with up to ten years old, and



bucket trucks for transportation of excavation, demolition and earthmoving waste. In order to better control solid waste collection and transport services, the vehicles have a GPS tracking and monitoring system capable of providing MSCPS real-time access to the primary geo-referencing data as well as the display of the historical tracking data of all accredited vehicles.

The areas of waste disposal are sites designated for the processing or disposal of waste. In this research, these areas are represented mainly by recycling plants, IMLAs, transshipment and sorting areas (TSA) and sandbanks. According to <sup>(14)</sup>, it is noticed that about half of the total CDW generated in the city is destined to IMLAs. Subsequently, the sandbanks correspond to 38% of the destination of the CDW. Recycling plants, which are responsible for the waste treatment, correspond to 8% of waste disposal destination, followed by TSAs, which are responsible for the correct sorting and disposal of 3% of the material (Figure 3).

Figure 3 – All classes waste and class A (except A1) waste percentage according to final destination 2016 - 2018



Considering only class A waste (Figure 3), except class A1 waste (sandy materials resulting from the preparation and excavation of land), about 71% are destined to IMLAs, followed by recycling plants (27%) and TSA (2%). It can be seen that most of the CDW is focused on the deposit of the material. In addition, the Metropolitan Region of Fortaleza has only two recycling plants in operation, leaving the TSAs and IMLAs to the final destination of the waste.

MSCPS plays a key role in the waste management policy of Fortaleza. An example of this is the creation of the Solid Waste Management Action Program, characterized by the implementation of progressive actions in various districts and regions of the city, involving solutions in areas such as

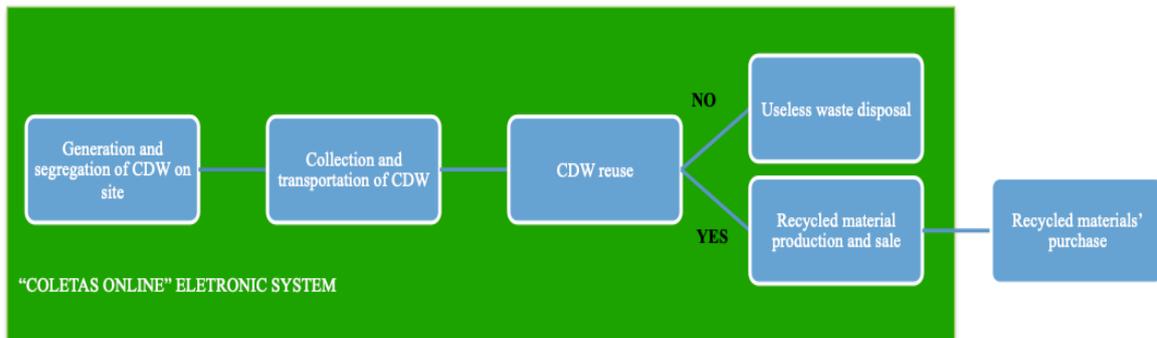


environmental legislation review, ecopoints creation, the electronic system Coletas Online control, accreditation and monitoring of transportation vehicles, among others.

## 4.2 Steps for CDW reverse logistics

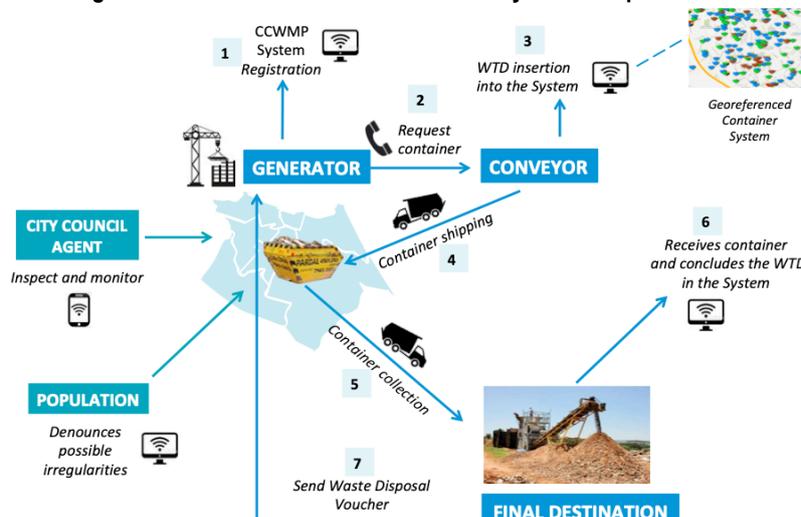
The CDW's reverse logistics consists of a sequence of activities performed by the actors described above, in order to know its operation, identify failures and propose improvements for the system. The builder starts the process by generating waste, seeking to reduce volumes, segregating the waste on site and depositing it in containers (Figure 4). The CDW transported by a licensed and accredited company may or may not be reused, depending on the class of the waste.

Figure 4 – Processes' flow



In cases of impossibility of treatment, the waste is disposed on landfill areas. Otherwise, the material is allocated for recycling plants, TSAs or IMLAs according to the waste reversibility potential. Finally, the production and sale of recycled products is responsible for the return of the material to the consumer market inside and outside the construction industry.

Figure 5 – Solid waste control electronic system's implantation <sup>(16)</sup>





Throughout this reverse chain, the Coletas Online system works as a tool to support the management of these activities. The first step consists of the CCWMP registration in the system by the construction company, followed by the choice of an accredited company available on the City Council website (Figure 5). The WTD input begins with the notification of the dispatch of the requested containers. When the shipment records and/or the removal of buckets are made in the system, both the municipality and the other stakeholders have control of the location of the buckets, as well as the delays for removal and transportation of the CDW to the landfill. The WTD confirmation is given after the container delivery and the checking of the CDW classification at the final disposal site. After completing this step, the waste destination confirmation is sent to the participants.

### **4.3 Obstacles to the progress of waste management in the city of Fortaleza**

It widely known among the parties interviewed that the lack of concern or mentality regarding environmental issues is one of the main obstacles to improve the construction waste management. The lack of knowledge and interest on the subject and the prevalence of financial issues over environmental aspects can also be included. During the interviews, all the participants mentioned the difficulty in changing the thinking of managers and construction workers as the possible cause of other problems, such as lack of supervision and government incentives.

The preferential – which implies a non-obligation – segregation or sorting of the waste at the origin, described in CONAMA resolution No. 307<sup>(8)</sup>, leads the generators to a discretionary attitude regarding the separation of the CDW components. In addition, in practice, the Fiscalization Agency of Fortaleza is also known by its deficiencies in the inspection of such requirements, which makes it difficult to take preventive and corrective measures.

The absence or inefficiency of supervision ends up being compromised with companies that act in an irregular way. Examples include the lack of a license for the execution of Works and the non-reduction and non-segregation of waste on site by the builders. The delay in the useless waste disposal and the receiving of waste outside the Coletas Online system is also a recurring issue among the interviewees. In addition, in the case of conveyors, the activities of several non-accredited



companies, not sending the WTD and the use of uncredited vehicles to increase the operational capacity of accredited companies are some of the complaints presented by the interviewees.

It is perceived that the expenses that a regularized company spends to meet sustainable goals end up making its contracting financially less advantageous than an irregular company. According to MSCPS data, garbage collectors and unlicensed transportation companies offer services at prices that correspond to one-third of the prices practiced by the regular market. As a result, the third obstacle, which deals with the lack of government incentives, becomes more understandable, since the implementation of various advantages, such as tax deductions, ends up making companies adhering to environmentally sound practices more competitive than the others .

According to those responsible for transportation and final destination, the lack of punishment inexorably drives the action of clandestine companies to remain active in the market. However, at the same time as the survey participants reveal a loosening of the law enforcement to fight clandestinity, they point out excessively heavy penalties on companies with legal action in the market.

The performance of some construction companies in disagreement with the SWNP prescription was strongly emphasized during the survey, being considered the main responsible for not reusing much of the CDW. In addition, cases where only part of the waste is transported by licensed companies during the day while another part is disposed of in irregular locations at night have been mentioned as frequente, as they represent a significant reduction of costs. It is noticed that shared responsibility is not always considered, since there is no concern on the part of the construction company in knowing the end given to the residue.

In addition, a common concern among generators and conveyors, the additional costs related to sustainable measures were cited as barriers to compliance with environmental guidelines. The purchase of materials for the waste segregation, a larger number of containers rental, personnel training, the need for eventual purchase of vehicles and expenses with the recycling plant and/or landfill area are examples of requirements that burden substantially the expenses of the stakeholders.

Finally, the final waste disposal sites face specific problems, even though they have strategies to combat them. If on the one hand these residues have a scientifically proven potential to act as substitutes for construction materials, on the other hand, the poor quality of their contents, lack of



techniques or high treatment costs limits the production of recycled materials that attract the consumer market, both in terms of quality and in relation to uncompetitive prices. Added to this, the bureaucratization for the opening and maintenance of this type of company has served as a great discouragement for the growth of this market in the city.

## 5. CONCLUSION

The research proved the need to study the CDW reverse chain – including its actors, functions and activities – to propose appropriate solutions to the obstacles listed by its participants. This need is due, in large part, to the interdependence of the actors in the chain, which ends up conveying the positive or negative consequences of an action for other participants, such as price increases and less use of waste.

Through the analysis of the processes' flow, it was verified that financial incentives such as reduction of taxes for producers and consumers of recycled products are necessary. There is a need for greater severity in the imposition of penalties and the establishment of an environmental target plan that stimulates accountability. Along with this, awareness policies and the normalization of sustainable behaviors are measures capable of mitigating the negative impacts of the reported obstacles.

Methods of waste quantification, such as the Coletas Online system, also represent useful aid instruments for generators and inspectors. This type of tool assists both in the estimation of volumes produced as well as in the verification of the estimated and the actual CDW volume transported to the final destination. In addition, systematization of data on the actual generation of waste by work, by surveying the exit volumes of the builders and entering the mills and landfills, would facilitate the control and investigation of possible deviations for irregular destinations.

The interviews allowed the knowledge of the generated waste, as well as the first components reused in the recycling plants; the actions taken to reduce waste on site; and the ways of treatment and reinsertion of the recycled product in the production chain. Thus, it was concluded that the objectives of analyzing the waste generation chain in Fortaleza under a sustainable perspective and proposing improvements to the reverse logistics process were achieved. For future research, it is suggested the search for a greater number of stakeholders, the creation of local indicators and the survey of international legislation on the subject.



## 6. REFERENCES

1. BOHNENBERGER, J. C. et al. Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 299–311, 2018.
2. CHILESHE, N.; RAMEEZDEEN, R.; HOSSEINI, M. R. Drivers for adopting reverse logistics in the construction industry: a qualitative study. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 23, n. 2, p. 134–157, 2016.
3. MANOWONG, E. Investigating factors influencing construction waste management efforts in developing countries: an experience from Thailand. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 1, p. 56–71, 2012.
4. SAIEG, P.; SOTELINO, E.D.; NASCIMENTO, D.; CAIADO, R.G.G. Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 788–806, 2018.
5. PEREIRA, A. L.; BOECHAT, C.B.; TADEU, H.F.B.; SILVA, J.T.M.; CAMPOS, P.M.S. **Logística reversa e sustentabilidade**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
6. SUNDARAKANI, B. et al. Modeling carbon footprints across the supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 1, p. 43–50, 2010.
7. NASIR, M. H. A. et al. Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 443–457, 2017.
8. BRASIL. **Resolução do CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União. Brasília, 2002.
9. ABRECON. Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015: **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2sj5Hh5>>. Acesso em: 10 jan. 2018.
10. MIRANDA, L. F. R. et al. Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. XVI **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 21, 2016.
11. COELHO, A.; DE BRITO, J. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part I: Location, materials, technology and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 338–352, 2013.12.
12. NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
13. BRASIL. Lei Federal no 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial da União. Brasília, 2010.
14. PREFEITURA DE FORTALEZA. **Relatório da Geração de Resíduos da Construção Civil em Fortaleza**, 2019. Disponível em: <<https://goo.gl/CdfRVK>>. Acesso em: 13 jan. 2019.



15. CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
16. PREFEITURA DE FORTALEZA. **Ecopontos**, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/uPQkXu>>. Acesso em: 26 out. 2018.



## TRATAMENTO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*Vanessa Oerle Kautzmann*<sup>(1)</sup>; *Monique Palavro Lunardi*<sup>(2)</sup>; *Regina Celia Espinosa Modolo*<sup>(3)</sup>; *Cláudio de Souza Kazmierczak*<sup>(4)</sup>; *Marlova Piva Kulakowski*<sup>(5)</sup>

(1) Universidade do Vale do Rio Sinos – voerlek@unisinis.br; (2) Universidade do Vale do Rio Sinos – monique.lunardi@hotmail.com; (3) Universidade do Vale do Rio Sinos – reginaem@unisinis.br (4) Universidade do Vale do Rio Sinos – claudiok@unisinis.br (5) Universidade do Vale do Rio Sinos – marlovak@unisinis.br

### RESUMO

A utilização de agregados reciclados de concreto (ARC) vem se mostrando cada vez mais necessária, com vistas a diminuir os resíduos de demolições e para diminuir a extração de matéria-prima para fabricação do concreto. Esse agregado, porém, possui menor qualidade quando comparado com os agregados naturais, isso porque existe uma camada de argamassa antiga aderida e a formação de mais uma zona de transição no concreto. Essa argamassa absorve maior quantidade de água que o agregado natural devido a sua porosidade e possui menor resistência, deixando o novo concreto mais susceptível à entrada de agentes agressivos e menos resistente. Assim, este estudo objetiva uma revisão dos métodos existentes para melhoria do agregado reciclado de concreto, citando suas vantagens e desvantagens. Os principais métodos são os que removem e os que promovem melhoramento da argamassa residual. Foi visto que os que promovem melhorias no ARC causam menos impactos ambientais comparados aos que retiram a argamassa residual, pois estes, além de consumirem maior quantidade de energia ainda precisam de descarte do resíduo gerado.

**Palavras-chave:** agregado reciclado de concreto, argamassa residual, tratamento de superfície.

## TREATMENT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE: A REVIEW

### ABSTRACT

Use of recycled concrete aggregates (RCA) has been shown to be increasingly necessary to reduce demolition waste and to reduce the extraction of raw material for concrete. However, this aggregate has lower quality when compared to natural aggregates, because there is an old adhered mortar and the formation of another interfacial transition zone (ITZ) in the concrete. This mortar absorbs more water than the natural aggregate, due to its porosity and has less resistance, leaving the new concrete more susceptible to the ingress of aggressive agents and reduced strength. Thus, this study aims to review the existing methods for improving the recycled concrete aggregate, citing its advantages and disadvantages. Most common methods are those that remove and those that promote improvement of the residual mortar. It has been seen that those who promote RCA improvements cause less environmental impacts compared to those that take away the residual mortar, besides consuming more energy, still need to discard the waste generated.

**Key-words:** recycled concrete aggregates, adhered mortar, enhancement treatment.

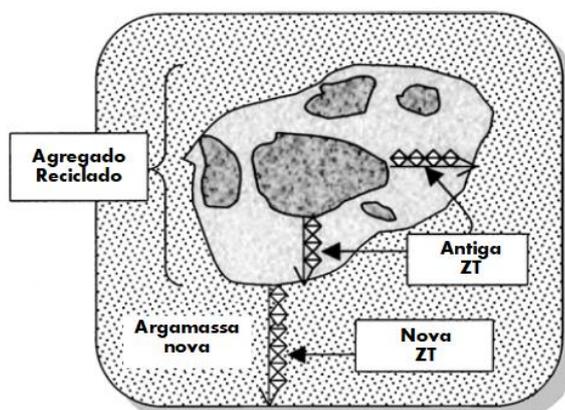


## 1. INTRODUÇÃO

O principal aspecto que diferencia o agregado reciclado de concreto (ARC) do agregado natural (NA) é a presença de pasta aderida a qual são atribuídas as características negativas do ARC, uma vez que esta parcela do agregado apresenta menor densidade e maior porosidade do que a fração de agregado natural. (DUAN; POON, 2014; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006; JUAN; GUTIÉRREZ, 2009) Estas características levam à redução de resistência mecânica e aumento da absorção de água do agregado como um todo, se comparado a agregados naturais. (KATZ, 2003; DE BRITO et al., 2016; LI, 2009; LEE; DU; SHEN, 2012)

A qualidade do ARC está atrelada à qualidade da argamassa do concreto de origem e à quantidade de pasta aderida. (TAM et al., 2007). Como o volume de argamassa aderida depende de fatores como resistência mecânica e processo de cominuição, é possível encontrar na bibliografia valores que variam de 20 a 70% para a quantidade, em massa, de pasta no ARC. Além disso, o ARC apresenta maiores regiões caracterizadas como zona de transição (ZT), já que, além da zona de transição formada entre a nova matriz cimentícia e o agregado reciclado, existe a ZT entre agregado natural e a pasta do concreto que originou o AGRC (Figura 1). (XIAO, J. et al., 2013; RYU, 2002)

Figura 1. Zona de transição em concretos com AGRC



Adaptado de (RYU, 2002)

A ZT é reconhecida como a região mais frágil do concreto por conter um menor empacotamento das partículas e maior acúmulo de água. (SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004). O filme de água criado no entorno do agregado contribui para que os íons sejam diluídos com facilidade originando cristais maiores e, muitas vezes, perpendiculares ao agregado, aumentando a porosidade e espessura da ZT. (MONTEIRO; MASO; OLLIVIER, 1985; MASO; 1980 apud Mehta; Monteiro, 2006)

Estudos foram desenvolvidos com o intuito de tratar o ARC, através da eliminação da argamassa aderida ou do melhoramento de propriedades da pasta, aproximando o desempenho de concretos formados apenas por agregados naturais aos concretos com incorporação de ARC, tornando o uso do ARC mais atraente tecnicamente.



## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos métodos de tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto, trazendo trabalhos de relevância internacional e de autores com experiência no assunto.

## **3. MÉTODOS**

A fim de reunir estudos a nível internacional, realizou-se pesquisa nos principais periódicos na área de materiais de construção, concreto, resíduos da construção, entre outros. Destacam-se os tratamentos destinados aos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), por estes diferirem em características e métodos de utilização em relação à fração fina de agregado reciclado. Foram selecionados os trabalhos mais atuais ou que descreviam de maneira mais detalhada os procedimentos para beneficiamento do AGRC.

## **4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO**

A seguir são apresentados os principais tratamentos aplicados aos agregados reciclados de concreto.

### **4.1. Remoção da argamassa residual do arc**

#### **4.1.1 Beneficiamento por processo mecânico**

Este processo utiliza moinho de bolas, equipamento de abrasão Los Angeles, triturador de rotor excêntrico, britador de mandíbula e demais moedores mecânicos. Montgomery (1998) utilizou um equipamento de abrasão Los Angeles como forma de melhorar a superfície do agregado. Observou-se que concretos desenvolvidos com agregados que passaram por mais rotações de abrasão tiveram um melhoramento tanto na resistência à compressão quanto nos ensaios feitos no estado fresco. O ensaio de abatimento mostrou uma melhor trabalhabilidade nos concretos feitos com o agregado reciclado com menor quantidade de argamassa residual.

Durante o processo de abrasão há a possibilidade de surgirem microfissuras na argamassa e na ZT, porém, são insignificantes quando comparadas ao ganho de desempenho após o tratamento. (NAGATAKI et al., 2004)

Apesar dos benefícios concedidos ao ARC, os processos mecânicos diminuem a quantidade de agregado reciclado originado de um bloco de concreto e aumentam a quantidade de finos residuais do processo abrasivo. (NAGATAKI et al., 2004)

Estes processos aumentam o consumo de energia e a emissão de CO<sub>2</sub> em cerca de 4 vezes mais que os processos convencionais de reciclagem. Entre os métodos, o que apresenta melhor eficácia é o abrasivo, quando comparado com os equipamentos de compressão (britador de mandíbula) e impacto. (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014)



#### 4.1.2 Beneficiamento por processo termo-mecânico

Consiste em enfraquecer a argamassa aderida por meio de aquecimento, podendo ser necessária a utilização de um britador para separação mais eficiente da argamassa (BRU et al., 2014). A literatura indica que o ARC quando submetido a temperatura de 550 °C perde cerca de 55% à 70% da pasta. (GEORGALI; TSAKIRIDIS, 2005). Para que a remoção de argamassa seja próxima da totalidade, a temperatura deve ser no mínimo de 750 °C. (MULDER; BLAAKMEER; NIJLAND, 2002) Bru et al. (2014) procederam a remoção da argamassa residual colocando os agregados em micro-ondas a 4,4kW durante meio minuto e após, passaram os agregados para um britador de impacto a 290rpm. O processo foi eficiente para a remoção da argamassa aderida, pois facilitou seu desprendimento do agregado gráudo natural e diminui a quantidade de energia gasta em britadores. Com relação ao consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>, apesar do processo com micro-ondas e britador despende maior quantidade de energia que o processo convencional de reciclagem, apresentou melhor eficiência energética quando comparado com os beneficiamentos mecânicos. O processo termo-mecânico perde essa vantagem quando utilizados forno rotativo ou forno a base de querosene. (QUATTRONE; ANGULO; JOHN, 2014)

#### 4.1.3 Limpeza com ultrassom

A limpeza em banho ultrassônico consiste em imergir o ARC em solução, em um tanque composto por gerador e transdutor. O gerador, através de energia elétrica, emite um sinal com uma certa frequência – no caso de frequências ultrassônicas este valor deve ser superior a 20 kHz – a partir do qual o transdutor passa a vibrar e emitir ondas que se propagam através do tanque e do líquido no seu interior. A vibração do líquido produz o fenômeno de cavitação, a partir do qual bolhas microscópicas colapsam e liberam energia. A energia do processo de cavitação pode ser usada como forma de desagregar partículas e, no caso específico dos agregados reciclados, como meio de eliminar partículas mais finas e frágeis da argamassa aderida ao agregado natural. Após o processo, é recomendável que se faça o enxágue dos agregados em água corrente, destilada ou deionizada.

Usualmente o banho em ultrassom é realizado com imersão em água, em ciclos de aproximadamente 10 minutos, cujo número de repetições vai depender da aderência da pasta, já que o processo é considerado encerrado quando a água da solução estiver limpa. Concretos de baixa resistência tendem a necessitar um maior número de ciclos, já que durante o processo de cominuição, a pasta mais frágil leva ao maior desprendimento de finos. (KATZ, 2004)

#### 4.1.4 Imersão em solução ácidas

Para este tratamento, utilizam-se diferentes concentrações e soluções de ácidos. Autores retratam o uso de ácido hidroclorídrico, ácido acético, ácido nítrico, ácido sulfúrico e ácido fosfórico (AL-BAYATI et al., 2016; TAM et al., 2007; ISMAIL; RAMLI, 2013). Usualmente o tempo de imersão dos agregados nas soluções ácidas é de 24 horas, após as quais o AGRC é lavado em água corrente ou destilada.

Autores estudaram a aderência de barras de aço em concretos feitos com AGRC com diferentes tratamentos, todos eles com a premissa de eliminação da argamassa aderida. Utilizou-se método químico com submersão do AGRC em solução ácida de 1 M por 24 horas; método mecânico em máquina de abrasão do tipo Los Angeles e método térmico com aquecimento a 500 °C por 2 horas e resfriamento brusco em água. O autor seguiu os métodos de Movassaghi, Babu et al. e Juan e Gutierrez, respectivamente. Ao empregar o método químico, obteve redução de 36,7 % de absorção de água em relação ao ARC sem tratamento, enquanto os métodos mecânico e térmico



apresentaram redução de 32,3 % e 17%. Justificaram os resultados através dos teores de argamassa no AGRC que foram de 2% para o tratamento com ácido, 5% para o mecânico e 11% para o térmico. (ATMAJAYANTI et al., 2018)

O método com imersão em soluções ácidas é considerado como um dos mais eficientes na retirada de pasta aderida de AGRC, porém envolve um processo perigoso e é necessário realizar tratamento dos resíduos.

## 4.2. Melhoramento da superfície do arc

### 4.2.1 Tratamento superficial com pastas pozolânicas

al.,2010; RYU, 2002). O processo de mistura costuma seguir o método em três estágios (item 3.4), que tem se mostrado eficiente. A pozolana, ao reagir com o CH livre, gera novos produtos de hidratação aumentando a durabilidade do concreto e melhorando o desempenho mecânico. (LI; XIAO; ZHOU, 2009; LEI et al., 2009)

Diferentes autores estudaram a imersão de ARC em soluções com materiais pozolânicos em uma (KATZ, 2004), duas (TAM; TAM, 2007) e até três fases (KONG, 2010). Percebe-se que o tratamento com adições se funde ao beneficiamento por ordem de mistura, aliando duas técnicas que visam a redução da absorção de água, pelo AGRC, da pasta do novo concreto. A Figura 2 ilustra os métodos de mistura.

Figura 2. Métodos de mistura em um, dois e três estágios



Adaptado (KONG et al., 2010)

O método de mistura tripla utilizado por Kong (2010) consistia em misturar por 15 segundos os agregados graúdos e finos reciclados com certa quantidade de água. Esta quantidade de água representava 1,2 vezes a diferença entre a massa total de água a ser inserida no concreto e a



parcela de água de amassamento da mistura. Depois, as adições minerais – neste caso cinza volante e escória de granulometria inferior a 45  $\mu\text{m}$  - são inseridas no misturador com os agregados úmidos, agitando-se por mais 15 segundos. O terceiro, e último estágio, é a introdução de cimento e superplastificante. Chegou-se a valores de resistência à compressão considerados equivalentes ao concreto de referência (com agregados naturais e mistura em 1 estágio) e superiores aos concretos com agregados reciclados preparados em dois estágios. Destaca-se o melhor desempenho da escória tanto no preenchimento de poros quanto na melhoria da ZT através da formação de produtos de hidratação. Com o uso de cinza volante houve um acréscimo de resistência, em relação aos concretos preparados em dois estágios, sendo observado o consumo de hidróxido de cálcio, porém em menor intensidade se comparado à escória utilizada. Os autores explicam este resultado pela maior reatividade e menor granulometria da escória. (KONG, et al., 2010)

#### 4.2.2 Carbonatação do ARC

Tem-se estudado a carbonatação do ARC de forma que haja colmatação dos poros da argamassa aderida. O  $\text{CO}_2$  reage com o hidróxido de cálcio presente na pasta formando carbonato de cálcio, preenchendo os poros e microfissuras da argamassa antiga (THIERY et al., 2007). Como os poros são preenchidos com os produtos da carbonatação como calcita e aragonita, há diminuição consideravelmente a absorção de água, tornando o agregado mais denso e melhorando seu desempenho mecânico e durabilidade. (XUAN; ZHAN; POON, 2017)

O processo de carbonatação em agregados reciclados reduz cerca de 49% as taxas de emissões de  $\text{CO}_2$ , pois captura gás carbônico em quantidade superior à sua emissão no meio ambiente. (HENTGES, 2018)

#### 4.2.3 Tratamento superficial com polímeros

Consiste na utilização de soluções de polímeros para formação de filmes na superfície do agregado diminuindo a absorção de água e preenchendo seus poros. Podem ser utilizados produtos como polidiorganosiloxanos (conhecidos como siloxanos ou PDMS) e alquilalkoxisilanos (conhecidos como silanos) com propriedade hidrofugante ou polímeros solúveis em água como silicato de sódio (SPAETH; TEGGUER, 2013). Há estudos que utilizam geopolímeros a base de cinza volante. (JOZEF; SICA KOVA, 2017)

A impregnação pode ser realizada em um ou dois estágios, mergulhando os agregados em uma solução por vez durante poucos minutos e efetuando sua posterior secagem. O processo de secagem pode ser efetuado em temperatura ambiente, em estufa ventilada ou ambos.

Em estudo realizado com seis soluções - com composição variando entre silicato de sódio, silanos e siloxanos em diferentes concentrações – e utilizando impregnação simples e impregnação dupla, os autores observaram que soluções com concentrações de 30% de silicato de sódio ou emulsão contendo silolano e silano promoveram os melhores resultados na redução de absorção de água. Os autores alertam para a combinação de dois banhos em soluções poliméricas, já que certas combinações aplicadas levaram a um resultado negativo, explicado pela interação entre os polímeros que gerou um filme instável e não aderente à superfície dos poros. (SPAETH; TEGGUER, 2013)

Outros autores utilizaram pasta de geopolímeros a base de cinza volante. Para isso utilizou-se dois métodos de impregnação: simples imersão e mistura em três estágios. Como resultado, percebeu-se redução na absorção de água em ambos os métodos e, no caso da mistura em três estágios,



aumento da resistência à compressão do concreto em relação a todas as outras misturas. (JUNAK; SICAKOVA, 2017)

### 4.3. Métodos de mistura

O melhoramento do ARC por método de mistura é o mais prático de ser realizado, dependendo apenas da ordem de colocação dos agregados na betoneira e do tempo da mistura. Basicamente o processo consiste em criar uma fina camada de cimento no entorno do agregado para que este produza uma melhor zona de transição entre o ARC e a nova pasta de cimento.

Existem processos de mistura em dois estágios (TAM; TAM, 2007) e os processos de mistura em três estágios (LEI et al., 2009). No último caso, ao invés de criar um filme de cimento em volta do agregado, cria-se um filme de materiais pozolânicos (sílica ativa, cinza volante, etc.). Este processo é descrito no item 4.2.1.

Autores observaram através de microscopia e nanoindentação que utilizando o método de dois estágios é possível obter concretos com ZT menos porosa e com menor teor de hidróxido de cálcio. (LI, et al., 2012)

## 5. CONCLUSÕES

A utilização de agregados reciclados mostra-se muito promissora quando são adotados métodos de tratamento, alcançando-se desempenhos similares a concretos com agregados naturais. Dentre os métodos - remoção de pasta aderida, tratamento superficial do agregado e método de mistura -, percebe-se que os dois últimos apresentam um caráter mais sustentável. Primeiramente por não gerarem mais resíduos através do descarte da pasta retirada do AGRC ou de ácidos, além de o consumo de energia, que em processos como alteração de ordem de mistura, permanece o mesmo de concretos que utilizam agregados naturais. Ainda há a possibilidade de se utilizar resíduos no tratamento superficial, como escórias, cinzas e, inclusive, o CO<sub>2</sub>. Deve-se levar em consideração o custo necessário para a aplicação dos processos e sua produtividade.

Os métodos que possuem maior disponibilidade de material bibliográfico são aqueles que envolvem tratamento superficial. Tratamentos mais específicos como retirada de argamassa aderida por micro-ondas ou banho em ultrassom, carecem de estudos. Percebe-se que os trabalhos mais antigos destacam a preocupação com a absorção de água do AGRC enquanto os trabalhos atuais dedicam atenção especial à qualidade da zona de transição. A preocupação com a microestrutura pode ter ganhado destaque pelo desenvolvimento de métodos de nanocaracterização pelo alcance de métodos eficazes na redução de absorção de água por parte do agregado reciclado.

## REFERÊNCIAS

1. ATMAJAYANTI, A. T.; SARAGIH, C. D.; HARYANTO, Y. The effect of recycled coarse aggregate (RCA) with surface treatment on concrete mechanical properties. In: The 4<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE 2018), 2018. **Anais**. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819501017>.
2. AL-BAYATI, H. K. A. et al. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v.



112, p. 284-298, 2016.

3. BRU, K. et al. International Journal of Mineral Processing Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. **International Journal of Mineral Processing**, v. 126, p. 90–98, 2014.
4. DE BRITO, J. et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1–16, 2016.
5. DUAN, Z. H.; POON, C. S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. **Materials and Design**, v. 58, p. 19–29, 2014.
6. ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 10, p. 683–690, 2006.
7. GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete . A case study. v. 27, p. 255–259, 2005.
8. HENTGES, T. I. **Tratamento do agregado reciclado de concreto por carbonatacao e por impregnacao de microfinos de ceramica vermelha**. 2018. 160f. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Sao Leopoldo, RS, 2018.
9. ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 464-476, 2013.
10. JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study of the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872-877, 2009.
11. JUNAK, J.; SICAKOVA, A. Concrete containing recycled concrete aggregate with modified surface. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 124-1291, 2017.
12. KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703–711, 2003.
13. KATZ, A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 597-603, 2004.
14. KONG, D. et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701-708, 2010.
15. LEE, C. H.; DU, J. C.; SHEN, D. H. Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 66–71, 2012.
16. LEI, T. et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2009.
17. LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolan powder on properties of recycled aggregate concrete. v. 23, p. 1287–1291, 2009.
18. LI, W. et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1045-1055, 2012.
19. LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 3, p. 107–112, 2009.
20. MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3o. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006. 647 p.



21. MONTEIRO, P. J. M.; MASO, J. C.; OLLIVIER, J. P. The aggregate-mortar interface. **Cement and concrete research**, [S.l.], v. 15, n. 6, p. 953-958, mar. 1985.
22. MONTGOMERY, D. G. Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate-proceedings of the International Symposium Held at Department of Trade and Industry Conference Centre. **Anais...1998**
23. MULDER, E; BLAAKMEER, J; NIJLAND, T. A closed material cycle for concrete as part of an integrated process for the reuse of the total flow of c & d waste. **Sustainable Concrete Construction**, v. 5, 2002.
24. NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. v. 34, p. 965–971, 2004.
25. QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Resources , Conservation and Recycling Energy and CO 2 from high performance recycled aggregate production. “**Resources, Conservation & Recycling**”, v. 90, p. 21–33, 2014.
26. RYU, J. S. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Journal of Materials Science Letters**, v. 21, n. 20, p. 1565-1567, 2002.
27. SCRIVENER, Karen L.; CRUMBIE, Alison K.; LAUGESSEN, Peter. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 411–421, 2004.
28. SPAETH, V.; TEGGUER, A. D. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 2, n. 2, p.143-152, 2013.
29. TAM, V. W. Y. et al. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 82-101, 2007.
30. TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 10, p. 3592–3602, 2007.
31. THIERY, M. et al. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 7, p. 1047–1058, 2007.
32. XIAO, J. et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 276-292, 2013.
33. XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 214–221, 2017.