

7° ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO

Atena Editora
Ano 2021

Atena Editora

Ano 2021



7° ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO

PROMOÇÃO

PATROCINADORES

APOIO

ORGANIZAÇÃO

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Camila Alves de Cremo
Imagens da capa
Agência Preview - Banco de Imagens
Edição de arte
Silvia Trein Heimfarth Dapper

2021 *by* Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do texto © 2021 Os autores
Copyright da edição © 2021 Atena Editora
Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.
Open access publication by Atena Editora

Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial
Ciências Agrárias e Multidisciplinar
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria

Atena Editora
Ano 2021

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Atena
Editora
Ano 2021

7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Indexação: Gabriel Motomu Teshima
Revisão: Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S495 7º Encontro nacional de aproveitamento de resíduos na construção / Organizadores Luciana Cordeiro, Sofia Bessa, Angela Borges Masuero, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Outros organizadores
Daniel Tregnago Pagnussat
Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Lais Zucchetti
Silvia Trein Heimfarth Dapper
Rosana Dal Molin
Fernanda Lamego Guerra
Caroline Giordani
Iago Lopes dos Santos
Maria Fernanda Menna Barreto
Maxwell Klein Degen
Natália dos Santos Petry
Rafaela Falcão Socoloski
Roberta Picanço Casaril
Aline Zini
Jéssica Deise Bersch
Thainá Yasmin Dessuy
Thaís do Socorro Matos da Silva

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-681-9
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.819210811

1. Construção civil. 2. Preservação ambiental. 3. Redução de impactos e o reaproveitamento de resíduos. I. Cordeiro, Luciana (Organizadora). II. Bessa, Sofia (Organizadora). III. Masuero, Angela Borges (Organizadora). IV. Título.

CDD 690

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2021

Declaração dos autores

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



Declaração da editora

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open acçess*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Apresentação

Um dos grandes desafios do setor da construção civil é a busca pela redução de resíduos oriundos dos mais diversos processos da produção industrial. Desta forma, é estimulada, no âmbito científico, a busca por alternativas que visam o reaproveitamento desses resíduos como matéria-prima na construção. Aliado a esta ideia, o 7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC) é um evento que visa incentivar a divulgação e discussão de ideias que possam embasar e desenvolver o setor da construção, levando em conta a ótica de preservação ambiental, redução de impactos e o reaproveitamento de resíduos.



Agradecimentos

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e ao Grupo FV, pelo apoio financeiro.

À ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, pelo apoio institucional.

À UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, NORIE – Núcleo Orientado para Inovação da Edificação, PPGCI – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura e LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído, pela organização.

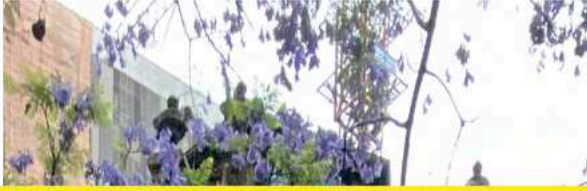
Ao Sinduscon-RS, pelo apoio e divulgação.

Aos autores, pela divulgação das pesquisas e à comissão científica pela sua avaliação.

A todos os participantes, pelas suas contribuições, presenças e interações.

Nosso muito obrigado a todos.







Comissão organizadora local

Profa. Dra. Angela Borges Masuero (UFRGS) - Comissão coordenadora

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS) - Comissão coordenadora

Profa. Dra. Denise Dal Molin (UFRGS) - Comissão coordenadora

Profa. Dra. Lais Zucchetti (UFRGS) - Comissão coordenadora

Profa. Dra. Silvia Trein Heimfarth Dapper (PUCRS)

Rosana Dal Molin (ANTAC) - Secretária ANTAC

Fernanda Lamego Guerra (Pós-Doc NORIE/UFRGS)

Caroline Giordani (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Deividi Maurente Gomes da Silva (Doutorando NORIE/UFRGS)

Iago Lopes dos Santos (Doutorando NORIE/UFRGS)

Maria Fernanda Menna Barreto (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Maxwell Klein Degen (Doutorando NORIE/UFRGS)

Natália dos Santos Petry (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Rafaela Falcão Socoloski (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Roberta Picanço Casaril (Doutoranda NORIE/UFRGS)

Aline Zini (Mestranda NORIE/UFRGS)

Jéssica Deise Bersch (Mestranda NORIE/UFRGS)

Thainá Yasmin Dessuy (Mestranda NORIE/UFRGS)

Thaís do Socorro Matos da Silva (Mestranda NORIE/UFRGS)



Comitê científico

Profa. Luciana Cordeiro (UFPA) – Comissão coordenadora

Profa. Sofia Bessa (UFMG) – Comissão coordenadora

Revisores

Abrahão Bernardo Rohden (FURB)
Adeildo Cabral (IFCE)
Adriana Gumieri (UFMG)
Aline Barboza (UFAL)
Ana Paula Maran (UFSM)
Ana Paula Milani (UFMS)
Anderson Muller (IFSC)
Andrea Franco (UFMG)
Ariane P. Rubin (UFSC)
Carina Stolz (FEEVALE)
Carlos Eduardo Marmorato (UNICAMP)
Cláudia Ruberg (UFPB)
Cláudio Kazmierczak (UNISINOS)
Dóris Bragança (UFRGS)
Edna Possan (UNILA)
Eduardo Grala (UFPel)
Eduardo Polesello (FEEVALE)
Elaine Antunes (UNESC)
Fabiano Pereira (UNESC)
Fabriccio Almeida (SENAI)
Feliciane Brehm (UNISINOS)
Felipe Moreira (UFPA)
Felipe Reis (IFPA)
Fernanda Costa (UFRB)
Fernando Almeida (UFMG)
Fernando José (UFMG)
Geilma Vieira (UFES)
Giselle Reis (SERG/RS)
Glaucinei Correa (UFMG)
Guilherme Brigolini (UFOP)
Guilherme Cordeiro (UENF)
Isaura Paes (UFPA)
Janaíde Rocha (UFSC)
Jardel Gonçalves (UFBA)
João Adriano Rossignolo (USP)
Juliana Moretti (UNIFESP)
Luciana Cordeiro (UFPA)
Lucimara Leal (IFPA)
Luiz Maurício Maués (UFPA)
Luizmar Lopes (UPF)
Marcelo Massulo (UFPA)
Marcelo Picanço (UFPA)
Márcia França (UFMG)
Maria Teresa Aguilar (UFMG)
Marlon Longhi (UFRGS)
Mauricio Pina (UFPA)
Maurilio Pimentel (UFPA)
Mirna Gobbi (PROARQ/UFRJ)
Mônica Leite (UEFS)
Muriel Froener (UCSul)
Patrícia Chaves (IFPA)
Patrícia Lovato (UPF)
Paulo Gomes (UFAL)
Rafael Mascolo (UNIVATES)
Ricardo Girardi (PUCRS)
Richard Lermen (IMED)
Risete Braga (UFPA)
Robson Fernandes (UFPA)
Rodrigo Silva (IMED)
Sabino Alves (UNIFESSPA)
Sandra Oda (UFRJ)
Sofia Bessa (UFMG)
Talita Miranda (UFMG)
Teresa Barbosa (UFJF)
Thiago Braga (UFPA)
Thiago Melo Grabois (UFRJ)
White dos Santos (UFMG)

SUMÁRIO

ÁREA 1 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MATERIAIS, COMPONENTES, ELEMENTOS E SISTEMAS COM APLICAÇÃO DE RESÍDUOS

CAPÍTULO 1.....1

PREVISÃO DO IMPACTO DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU NO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO

MEDEIROS; Victor Amadeu Sant' Anna; CRUZ; Bruna Ramos de Souza; ALCAZAS; Juliana Carrasco; MILANI; Ana Paula da Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108111

CAPÍTULO 2.....9

PROPRIEDADES REOLÓGICAS E HIDRATAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTOS TERNÁRIOS CONTENDO RESÍDUOS DE MÁRMORE, PORCELANATO, BLOCO CERÂMICO E FOSFOGESSO

COSTA; Ana Rita Damasceno; GONÇALVES; Jardel Pereira

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108112

CAPÍTULO 3.....17

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MOAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS PARA APLICAÇÃO COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

COSTA; Ana Rita Damasceno; GONÇALVES; Jardel Pereira

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108113

CAPÍTULO 4.....26

EFEITO DA SÍLICA ATIVA NA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO ATRAVÉS DO MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSAS

CRUZ DA SILVA ARAUJO; Juliene; PEREIRA BONFIM; Francirene; PEREIRA GOUVEIA; Fernanda

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108114

CAPÍTULO 5.....33

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MOAGEM DO RESÍDUO DE FCC NA HIDRATAÇÃO INICIAL DO CIMENTO POR CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

OLIVEIRA; Josinorma Silva de; ANDRADE; Heloysa Martins Carvalho, GONÇALVES; Jardel Pereira

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108115

CAPÍTULO 6.....42

MÉTODO DE RIETVELD PARA QUANTIFICAÇÃO DE FASES EM RESÍDUOS PARA USO COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)

MATOS; Samile Raiza Carvalho; COSTA; Ana Rita Damasceno; OLIVEIRA; Josinorma Silva de; MACIEL; Kuelson Rândello Dantas; GONÇALVES; Jardel Pereira

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108116

CAPÍTULO 7.....51

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE MISTURAS SOLO-RESÍDUO VISANDO A UTILIZAÇÃO COMO BARREIRAS IMPERMEÁVEIS EM ATERROS SANITÁRIOS

BRESSAN JUNIOR; José C.; ZAMPIERI; Lucas Q.; NIENOV, Fabiano A.; LUVIZÃO, Gislaine

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108117

CAPÍTULO 8.....58

NEUTRALIZAÇÃO DO FOSFOGESSO COM CAL E A SUA INFLUÊNCIA NA HIDRATAÇÃO E NO DESEMPENHO MECÂNICO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

ANDRADE NETO; José S.; BERSCH; Jéssica D.; SILVA, Thaís S. M.; RODRÍGUEZ, Erich D.; SUZUKI, Seiiti; KIRCHHEIM; Ana Paula

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108118

CAPÍTULO 9.....66

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA EM ARGAMASSAS NA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO OU DO CIMENTO

TORRES; Ariela da Silva; PINZ; Francielli Priebbernow; PALIGA; Charlei Marcelo

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108119

CAPÍTULO 10.....73

DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E SIDERURGIA

BARRETO; Rodrigo Rony; MENDES; Vitor Freitas; FARDIN; Welington; SANTANA; Vanessa Pereira; MENDES; Julia Castro

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081110

CAPÍTULO 11.....81

CARBONATAÇÃO NATURAL EM CONCRETO COM RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM SUBSTITUIÇÃO AO AGLOMERANTE

COSTA; Vitória Silveira da; TEIXEIRA; Fernando Ritiéle; PALIGA; Charlei Marcelo; TORRES; Ariela da Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081111

CAPÍTULO 12.....88

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO ARGILITO NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

SILVA; Thaís; BERSCH; Jéssica; ANDRADE NETO; José; MASUERO; Angela; DAL MOLIN; Denise

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081112

CAPÍTULO 13.....95

EFEITO DA ADIÇÃO DE CINZA DE OLARIA NO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA DE SOLO ARGILOSO DA REGIÃO DE GUARAPUAVA-PR

KADLOBICKI; Lucas; TRENTO; Vanderlei; PAULINO; Rafaella Salvador; DA SILVA; Sauana Centenaro

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081113

CAPÍTULO 14.....103

ANÁLISE CRÍTICA DOS MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) BASEADA EM CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DE CONCRETOS RECICLADOS

FERREIRA; Guilherme de Andrades; NEUMANN; Isadora Sampaio; SANTOS; Iago Lopes; DAL MOLIN; Denise Carpena Coitinho

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081114

CAPÍTULO 15.....111

CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE ELEVADA REATIVIDADE PRODUZIDA VIA FRACIONAMENTO DENSIMÉTRICO E MOAGEM ULTRAFINA

LINHARES, Beatriz Dias Fernandes; LEMOS, Mônica Nunes; CORDEIRO, Guilherme Chagas

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081115

CAPÍTULO 16.....119

GEOPOLÍMERO A BASE DE METACAULIM: MEDIDAS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

COSTA, Rayara Pinto; PY, Lucas Goldenberg; SACARDO, Lucas Eduardo Perin; LONGHI, Marlon Augusto; KIRCHHEIM, Ana Paula

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081116

CAPÍTULO 17.....127

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DE POLIPROPILENO TRITURADO

GARCIA; Adson de Sousa; SILVA; Barbara Cristina Soares; JÚNIOR; Paulo Sergio Barreiros de Leão; SOUZA; Grazielle Tigre de

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081117

CAPÍTULO 18.....134

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS UTILIZANDO RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE (DREGS E GRITS)

ALVARENGA; Bruno Medeiros de; FALCÃO; Juliane Rodrigues; TESSARO; Alessandra Buss; MATTOS; Flávia Costa de

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081118

CAPÍTULO 19.....142

CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS MISTAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

HERMENEGILDO, Gabriela C.; CARNEIRO, Gisele O. P.; NOGUEIRA, Júlia A. W.; BEZERRA, Augusto C., BESSA, Sofia A. L.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081119

CAPÍTULO 20.....150

EFEITO DE UMA RESINA POLIMÉRICA NA ABSORÇÃO DE PEDRAS ARTIFICIAIS DE CALCÁRIO LAMINADO

BEZERRA; Ana Karoliny Lemos; SILVA; Leonária Araújo; ARAÚJO; Lucas Benício Rodrigues; CABRAL; Antonio Eduardo Bezerra

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081120

CAPÍTULO 21.....158

CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) GERADA EM LEITO FLUIDIZADO

PAGLIARIN; Karine; JORDANI; Bárbara; KOPPE; Angélica

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081121

CAPÍTULO 22.....166

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SUBPRODUTOS NA DISPERSÃO DE PARTÍCULAS DE CIMENTO

MARTINS; Julia; ROCHA; Janaíde

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081122

CAPÍTULO 23.....173

COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM GRÃOS DE POLIPROPILENO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À FLEXÃO

COELHO,Rivaldo Teodoro; DUCATTI, Vitor Antonio; SALADO, Gerusa de Cássia

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081123

CAPÍTULO 24.....180

COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM BAIXO TEOR DE CASCA DE ARROZ COMO BIOAGREGADO

AMANTINO, Guilherme; TIECHER, Francieli; HASPARYK, Nicole; TOLEDO, Romildo

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081124

CAPÍTULO 25.....187

ANÁLISE DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RESÍDUO DE MARMORARIA EM DIFERENTES FATORES ÁGUA CIMENTO

ALMADA, Bruna S.; SANTOS, White J.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081125

CAPÍTULO 26.....195

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RESÍDUO DE MARMORARIA COM FIXAÇÃO DA TRABALHABILIDADE PELO USO DE ADITIVOS PLASTIFICANTE

ALMADA, Bruna S.; SANTOS, White J.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081126

CAPÍTULO 27.....202

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA NA PAVIMENTAÇÃO

SANTOS, Marianny Viana dos; SOUZA, Wana Maria de; RIBEIRO, Antonio Junior Alves

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081127

CAPÍTULO 28.....208

RESÍDUO DE CONCRETO COMO SUBSTITUTO AO CIMENTO: AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DAS EMISSÕES

OLIVEIRA; Dayana Ruth Bola; LEITE; Gabriela; POSSAN; Edna; MARQUES FILHO; José

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081128

ÁREA 2 - DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS COM RESÍDUOS

CAPÍTULO 29.....216

USO DO RESÍDUO DA NEFELINA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

ROSA; Laura Pereira; HALTIERY; Diego Santos; PEREIRA; Fabiano Raupp; ANDRADE; Lucimara Aparecida Schambeck

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081129

CAPÍTULO 30.....224

INFLUÊNCIA DA MAGNETITA E DA BARITA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

MAZZARO; Filipe S.; ALVES; Jordane G.S.; ALMEIDA; Fernando C.R.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081130

CAPÍTULO 31.....232

UTILIZAÇÃO DE CINZA PESADA DE BIOMASSA DE PINUS TAEDA COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO CONVENCIONAL

BARCAROLI; Bruno Crimarosti; SALAMONI; Natália; ROHDEN; Abrahão Bernardo

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081131

CAPÍTULO 32.....240

ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO

REUPS; José Eduardo Angeli; NIEMCZEWSKI; Juliana Alves Lima Senisse

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081132

CAPÍTULO 33.....248

AVALIAÇÃO DO USO DO PÓ DE RETIFICA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO

AVERNA; Larissa Bertho; MATTEDI; Carolina Vieira; DE ABREU; Victor Barreto; CONTINI; Paulo Victo Matiello; MARIANI; Bruna Bueno

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081133

CAPÍTULO 34.....256

CRIAÇÃO DE REVESTIMENTOS BIOINSPIRADOS A PARTIR DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO

MENEGUEL, Carolina Frota; DAPPER, Silvia Trein Heimfarth

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081134

CAPÍTULO 35.....264

CONSTRUÇÃO DE QUIOSQUES COM TUBOS DE PAPELÃO EM EVENTOS TEMPORÁRIOS

DIAS; Nathalia Schimidt; SALADO; Gerusa de Cássia

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081135

CAPÍTULO 36.....272

REUTILIZAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM ARGAMASSAS

MARAN, Ana PauLa; MENNA BARRETO, Maria Fernanda; MASUERO, Angela Borges; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081136

CAPÍTULO 37.....281

CINZAS DE BIOMASSA GERADAS NA AGROINDÚSTRIA DE MALTE: CARACTERIZAÇÃO E USO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS

DA SILVA; Sauana Centenaro; DA SILVA; Joaõ Adriano Godoy; PAULINO; Rafaella Salvador

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081137

CAPÍTULO 38.....289

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCD EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL AOS NATURAIS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETOS ADENSADOS DE FORMA MANUAL E MECÂNICA

SARTORE; Igor Carlesso; PAULINO; Rafaella Salvador; TORALLES; Berenice Martins

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081138

CAPÍTULO 39.....297

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL POR PÓ DE PEDRA EM TUBOS DE CONCRETO

COLONETTI; Luís Gustavo Vieira; PIROLLA; Douglas Leffa; PIVA; Jorge Henrique; MACCARINI; Helena Somer; WANDERLIND; Augusto; ANTUNES; Elaine Guglielmi Pavei

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081139

CAPÍTULO 40.....305

PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO E AGREGADO POR CINZAS DE CARVÃO VAPOR

PADILHA; Lilian; PIROLLA; Douglas Leffa; PIVA; Jorge Henrique; SAVI; Aline Eyng; WANDERLIND; Augusto; ANTUNES; Elaine Guglielmi Pavei

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081140

CAPÍTULO 41.....312

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO AXIAL DE ARGAMASSAS MISTAS

SCHILLER; Ana Paula Sturbelle; PALIGA; Charlei Marcelo; TORRES; Ariela da Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081141

CAPÍTULO 42.....319

PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS DE MADEIRA PRODUZIDOS COM PINUS, PALHA DE MILHO, POLIETILENO TEREFTALATO E POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA

SOUZA; Matheus; CAZELLA; Pedro H. S.; RODRIGUES; Felipe R.; PEROSSO; Marjorie B. S.; SILVA; Sérgio A. M.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081142

CAPÍTULO 43.....327

ESTUDO DO EMPREGO DE AGREGADOS CERÂMICOS EM CONCRETO PERMEÁVEL

STRIEDER; Helena L.; DUTRA; Vanessa F. P.; GRAEFF; Ângela G.; MERTEN; Felipe R. M.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081143

CAPÍTULO 44.....335

PRODUÇÃO DE PISOS INTERTRAVADOS EM ESCALA INDUSTRIAL COM A INCORPORAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO

GHISLENI; Geisiele; LIMA; Geannina Terezinha dos Santos

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081144

CAPÍTULO 45.....343

APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DA REGIÃO AMAZÔNICA EM ÁLCALI-ATIVADOS VISANDO O SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

RIBEIRO; Rafaela Cristina Alves; CAMPOS; Patrick Cordeiro; BRITO; Woshington da Silva; PICANÇO; Marcelo Souza; GOMES-PIMENTEL; Maurílio

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081145

CAPÍTULO 46.....350

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE CINZA VOLANTE DE

MINÉRIO DE CARVÃO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO

BICA; Bruno O.; PADILHA; Francine; ROCHA; Janaíde; GLEIZE; Philippe

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081146

CAPÍTULO 47.....358

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO QUARTZOSO POR AGREGADO MIÚDO DE BRITAGEM DE ROCHA BASÁLTICA EM CONCRETO

WALKER; Wesley Ramon; MEINHART; Alice Helena; ARNOLD; Daiana Cristina Metz; DIAS; Letícia Andriolli

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081147

CAPÍTULO 48.....365

AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE ARENITO COMO AGREGADO MIÚDO EM MATRIZ DE ARGAMASSA

MARIO, Mauro; GIORDANI, Caroline; MASUERO, Angela Borges; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081148

CAPÍTULO 49.....373

O RESÍDUO DE NIÓBIO E SUAS POTENCIAIS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO DA LITERATURA

ALVES; Jordane G.S.; MAZZARO; Filipe S.; ALMEIDA; Fernando C.R.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081161

CAPÍTULO 50.....380

PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS PRODUZIDOS PARA NÚCLEO DE PAINEL SANDUÍCHE

PEREIRA; Alexandre Rosim; ROSSIGNOLO; João Adriano

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081150

ÁREA 3 - GESTÃO DE RESÍDUOS

CAPÍTULO 51.....388

IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DA GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CAMPO GRANDE – MS

PUPIN; Nayara Severo; MAIA; Johnny Hebert de Oliveira; MILANI; Ana Paula da Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081151

CAPÍTULO 52.....395

O CICLO DA GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA UFRGS

ANTUNES; Giselle Reis; RODRIGUES; Eveline Araujo; SIMONETTI; Camila

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081152

CAPÍTULO 53.....403

ANÁLISE SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE/RS

ROCHA, Paulyne Vaz; SOUZA; Ana Lilian Brock de; PETRY, Natália dos Santos

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081153

CAPÍTULO 54.....412

ANÁLISE DO PLANO DE GESTÃO MUNICIPAL INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE RIO BRANCO – AC, SOB A ÓTICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

VIANA; Tiago H. da Costa; MONTEIRO; Késsio Raylen; SEGOBIA; Pedro Bomfim

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081154

ÁREA 4 - ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

CAPÍTULO 55.....420

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM FIBROCIMENTOS

BASSAN DE MORAES; Maria Júlia; SOARES TEIXEIRA; Ronaldo; PROENÇA DE ANDRADE; Maximiliano; MITSUUCHI TASHIMA; Mauro; ROSSIGNOLO; João Adriano

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081155

CAPÍTULO 56.....428

PROJETO SARGOOD: VALORIZAÇÃO DO *SARGASSUM* NA CONSTRUÇÃO CIVIL

ROSSIGNOLO, João Adriano; BUENO, Cristiane; DURAN, Afonso Jose Felicio Peres; LYRA, Gabriela Pitolli; ASSUNÇÃO, Camila Cassola; GAVIOLI, Leticia Missiato; MORAES, Maria Julia Bassan; NASCIMENTO, João Lucas Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081156

CAPÍTULO 57.....436

VALORIZAÇÃO DO CAULIM FLINT COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR (MCS)

MEDEIROS; Matheus Henrique Gomes de; MATOS; Samile Raiza Carvalho; DESSUY; Thainá Yasmin; MASUERO; Angela Borges; DAL MOLIN; Denise Carpena Coitinho

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081157

ÁREA 5 - AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DO CICLO DE VIDA

CAPÍTULO 58.....443

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO_2 DE PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL: COMPARAÇÃO ENTRE O USO DE AGREGADOS DE RCD E NATURAIS

CASARIN; Roberta P.; ARAGÃO; Lucas C.; ZAPPE; Anna Paula S. ; THOMAS; Mauricio; PASSUELO; Ana Carolina B.

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081158

CAPÍTULO 59.....451

O IMPACTO AMBIENTAL DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOB A VISÃO DO CICLO DE VIDA

KONZEN; Bárbara Anne Dalla Vechia; PEREIRA; Andréa Franco

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081159

CAPÍTULO 60.....462

PEGADA DE CARBONO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM FINOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

FERREIRA; Luiza de Souza; DESSUY; Thainá Yasmin; GLITZEHNIRN; Claudia; PASSUELLO; Ana; MASUERO; Angela Borges

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081149

CAPÍTULO 61.....468

AVALIAÇÃO DOS PARAMETROS SUSTENTÁVEIS PARA PAVERS CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS

ALTOÉ; Silvia Paula Sossai; GOÉS; Isadora; ROTTA; José Venancio Pinheiro; BORIN; Mateus Roberto

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081160

PREVISÃO DO IMPACTO DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU NO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108111

MEDEIROS; VICTOR AMADEU SANT' ANNA[1]; CRUZ; BRUNA RAMOS DE SOUZA[2]; ALCAZAS; JULIANA CARRASCO[3]; MILANI; ANA PAULA DA SILVA[4]
[1]IFMS; [2]UFMS; [3]UFMS; [4]UFMS;
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: VICTOR.MEDEIROS@IFMS.EDU.BR

RESUMO: Por razões sustentáveis é importante avaliar a influência da inserção de resíduos de borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de compósitos cimentícios. Diante disso, levantou-se um banco de dados contendo as características de concretos adicionados de resíduos de borracha e analisou-se o desempenho mecânico através de teste de outliers, de normalidade e de frequência. Por último, determinou-se um modelo de regressão com as variáveis tamanho da borracha, teor de borracha, relação água/cimento e resistência à compressão axial. Com os resultados foi possível apresentar a tendência do comportamento mecânico do compósito cimentício com resíduos de borracha.

PALAVRAS-CHAVES: Regressão linear múltipla, concreto, resistência à compressão simples, aplicação de resíduos.

ABSTRACT: For sustainable reason, it is important to evaluate the influence of rubber waste from worn out tires on the mechanical performance of cementitious composites. With this purpose, a database was created containing the characteristics of concrete added with rubber waste. So, the mechanical performance could be analyzed through outlier's tests, normality tests and frequency tests. After that, a model of regression was made with the variables: rubber size, rubber content, water/cement ratio and resistance to compression. With the results it was possible to present the tendency of the mechanical behavior of the cementitious composite with rubber residues.

KEYWORDS: Multiple linear regression, concrete, axial compressive strength, waste reuse.

1 | INTRODUÇÃO

Uma forma de uso das partículas de borracha de pneus é na matriz cimentícia, ou seja, em argamassas, concretos, e outros artefatos, criando um compósito cimentício com características vantajosas no que diz respeito ao melhoramento do desempenho térmico e acústico, ductibilidade e durabilidade desses materiais(1).

A melhora no desempenho térmico do concreto foi constatada por Shah et al.(2) que identificou o aumento da resistência térmica com aumento do teor de borracha no compósito. Nos estudos de Holmes et al.(3) e de Mohammed et al.(4) foi identificada a propriedade de melhor absorção sonora com a utilização de borracha de pneus. Além disso, a adição de fibras de borracha na mistura de concreto aumenta a resistência

à tração na flexão, bem como há a redução no módulo de elasticidade no concreto incorporado, o que indica maior ductibilidade[1],[5].

Outra propriedade relevante dos compósitos cimentícios com borracha é a durabilidade. No estudo de Yung et al.[6] com borracha de pneus inservíveis em pó, foi possível obter concretos com menores níveis de corrosão. Gupta et al. [1] verificaram que a profundidade do desgaste a abrasão nas condições mais adversas é inferior aos limites normativos, em misturas com inclusão de cinzas de borracha e fibras de borracha, o que demonstra melhora de resistência à abrasão. Entretanto, Torgal et al.[7] realizaram um levantamento de trabalhos científicos sobre o tema, e concluíram que a durabilidade ainda necessita de maiores investigações. Ainda devem ser abordadas questões como a influência dos resíduos nas diferentes propriedades do concreto e de como o processamento e a preparação das partículas de borracha de pneu inservível pode melhorar a durabilidade do concreto.

Assim, o presente trabalho, por meio da utilização de *database*, parametrizou as métricas tamanho e quantidade de borracha de pneus, relação água/cimentícios (a/c) e suas influências frente a propriedade mecânica do concreto para a estimativa de resistência à compressão dos compósitos de concreto adicionados de partículas de borracha de pneus inservíveis.

2 | MÉTODOS

Para correlacionar a incorporação da borracha de pneu nos compósitos cimentícios com parâmetros de desempenho foi utilizada a *database* de Alcazas[8], construída por meio do levantamento bibliométrico abrangendo o período de 1999 a 2017.

Para a seleção dos artigos científicos foi aplicado a medida de aderência ao tema concreto com borracha de pneu, sendo descartados os dados de artigos que continham cinza de borracha, resíduos de pneus de origem polimérica e outros compósitos - como argamassa.

Com o montante de 45 pesquisas selecionadas, foi realizada a extração de diversos dados, como: tipo de aplicação do concreto; origem, tamanho e quantidade da borracha; consumo de cimento; relação água/cimento; tipos de ensaios realizados nas pesquisas. Para a extração de dados dos gráficos desses artigos foi utilizado o software livre *WebPlotDigitalizer*.

Em todas as publicações selecionadas foram realizados ensaios mecânicos de compressão axial, sendo que na maioria dos estudos (~85%) não foi feito nenhum tratamento no resíduo da borracha de pneu. A forma de aplicação do resíduo de borracha nas misturas cimentícias foi feita por substituição na maior parte da bibliografia, sendo que em 62% dos estudos foi feita a substituição como agregado miúdo.

Para isolar ao máximo a diversidade da composição do concreto foi utilizado um critério de amortização nomeado aspecto de relação (A.R.) para o conjunto de dados de cada artigo analisado. Este indicador é a resultante da relação entre os dados encontrados para o valor de resistência à compressão simples do concreto com a porcentagem X% de borracha incorporada (V.S.X%) e o valor, do concreto sem borracha (V.S.0%), Equação (1).

$$A.R. = \frac{V.S_{x\%}}{V.S_{0\%}} \quad (1)$$

2.1 Avaliação do comportamento mecânico

Esta análise da *database* partiu da reunião das pesquisas selecionadas em agrupamentos com características similares de tamanho da borracha e de relação a/c para a verificação da influência destas variáveis na A.R resistência à compressão simples do concreto conforme o aumento do teor da borracha adicionado no compósito cimentício. Esses agrupamentos, ou grupos, estão destacadas na Tabela 1.

Grupos	Limites (mm)			Grupos	Relação a/c
	Mínimo	Máximo	Denominação		
I1		<0,6	Finos	A2	0,55<A2≤0,60
I2	≥0,6	<4,75	Fragmentada	A3	0,45<A2≤0,55
I3	≥4,75	<12,5	Granulada	A4	A2≤0,45
I4	≥12,5	<50	Pedaços		

Tabela 1 – Agrupamentos adotados para tamanho dos resíduos de borracha de pneus (esq.) e para agrupamentos da relação a/c (dir.).

Fonte: Autores (2021).

Nesta etapa, os resultados encontrados das correlações existentes da *database* foram analisados estatisticamente pela aplicação do teste de *outilers*, teste de normalidade e de frequência. Para a análise dos valores amostrais discrepantes foi utilizado o Critério de Chauvenet aplicado aos erros entre o A.R. real e o estimado. O teste de Chauvenet foi realizado segundo as instruções e especificações de Holman[9], e os pontos discrepantes foram retirados, sendo geradas novas correlações com melhor coeficiente de determinação (R-quadrado).

No teste de normalidade foi utilizado o programa *Rstudio*, sendo adotado o teste Shapiro-Wilk em um valor amostral de 3 a 5.000 amostras, e o nível de significância considerado normal *p-value* maior que 0,05. Se F<0,05, a hipótese nula é descartada e a variável aleatória adere a distribuição Normal.

2.2 Equação de regressão linear múltipla

O A.R resistência à compressão simples do concreto com adição de borracha de pneus inservíveis (σ_{AR}) foi definida como a variável dependente, enquanto as variáveis independentes definidas foram: tamanho da borracha ($T_{borracha}$) em mm; o percentual de borracha ($B_{\%}$); e a relação a/c ($R_{a/c}$).

Após a obtenção dos parâmetros que definem a equação de regressão linear múltipla (RLM), foi realizada a análise dos dados gerados utilizando o software *Excel* para determinar se as variáveis independentes utilizadas realmente são capazes de ajudar na previsão da variável dependente e se o modelo é adequado ou deve ser descartado. Para tanto foram analisados: F de significância global (ANOVA), p-valor de cada variável

independente, R-quadrado e R-quadrado ajustado.

O teste ANOVA serviu de parâmetro de confirmação das variáveis no modelo, com nível de confiança considerado foi de 95% e hipótese nula de que os coeficientes da regressão são nulos. Assim, quando o valor-p do F de significação global do modelo é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula e se confirma que ao menos uma das variáveis são significativas para o modelo. A seleção das variáveis da regressão foi realizada manualmente pelo método de eliminação para trás – *stepwise* - com critério de saída de uma variável quando p-valor>0,05. O R-quadrado ajustado foi escolhido como indicador do grau de ajustamento do modelo quando comparamos regressões com diferentes quantidades de variáveis porque o R-quadrado aumenta com o acréscimo de variáveis ao modelo[10].

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Avaliação do comportamento mecânico

Analisando o comportamento mecânico do concreto com resíduos de borracha de pneus inservíveis (Figura 2) observa-se que houve a diminuição do A.R. resistência à compressão simples tanto quanto foi o aumento da substituição dos agregados graúdos e/ou miúdos pelo resíduo de borracha, independentemente do tamanho da borracha e da relação água/cimento - corroborando relatos de Gupta et al.[11] e Girskas e Nagrockiene[12].

A principal razão da redução das resistências mecânicas deve-se a macroporosidade do concreto com borracha que possui maior teor de ar, atribuído as características da borracha de repelir a água (hidrofóbica) e atrair o ar, diferentemente das características de um agregado natural[13].

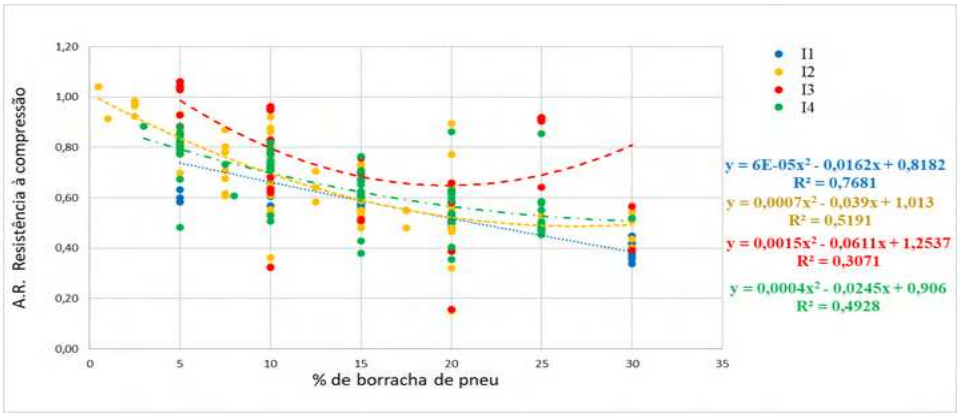


Figura 2 – A.R. da resistência à compressão em relação a quantidade (%) de borracha de pneus inseridas no concreto para agrupamentos de tamanho.

Fonte: Autores (2021).

Pelos valores de R-quadrado da Figura 2, verificou-se que a curva de tendência mais significativa foi a obtida pelo Grupo I1 (Finos), isto porque a maioria dos resultados deste grupo foi proveniente do trabalho de Mohammed e Azmi[13]. Mesmo grupo que teve a queda de resistência a compressão mais acentuada com o aumento da quantidade de borracha.

O Grupo I3 apresentou maior alcance do A.R. resistência à compressão, presumindo que os resíduos de borracha granulares têm menor influência no comportamento mecânico do concreto. Porém, este melhor comportamento foi interferido pelo aumento significativo da curva de tendência a partir da adição da borracha no teor de 25%. Este ponto foi uma exceção, refletindo no menor valor de R-quadrado e teste de normalidade negativo para curva de tendência Grupo I3. O que é condizente aos trabalhos de Gesoğlu et al.[14], que verificou que a perda de compressão é maior nos conteúdos em que a borracha tem tamanho maior (Grupo I4) quando comparada ao I3.

Pelos valores de significância baixos dos R-quadrados indicados, e a diversificação dos estudos quanto ao modo de inserir a borracha e os seus tamanhos, é possível inferir que os tamanhos têm influência diferente em cada grupo. O que afirma que o tamanho da borracha é algo que precisa ser aprimorado, devido a forma variada como os autores dos artigos os apresentam.

A Figura 3 mostrar que a adoção de uma a/c no grupo A3 ($0,45 < a/c \leq 0,55$) promove um maior impacto no comportamento mecânico dos concretos adicionados de borracha em relação ao uso de uma a/c no grupo A4 ($a/c \leq 0,45$). Isto, porque os valores de a/c menores que 0,45 resultam na maior significância da matriz cimentante no comportamento mecânico do concreto convencional do que outros materiais da composição.

O teste de normalidade mostrou resultado negativo para a maioria das regressões e constatou normalidade apenas para o Grupo I1 (finos), o qual é um grupo caracterizado pela composição da maioria dos dados de um único pesquisador. Em regressões a falta de normalidade indica baixa validade dos intervalos de confiança das equações e de testes de hipóteses[15]. Assim, os gráficos analisados servem sobretudo como parâmetro de tendência do comportamento mecânico, mas sem previsibilidade de confiança baseadas na suposição de normalidade.

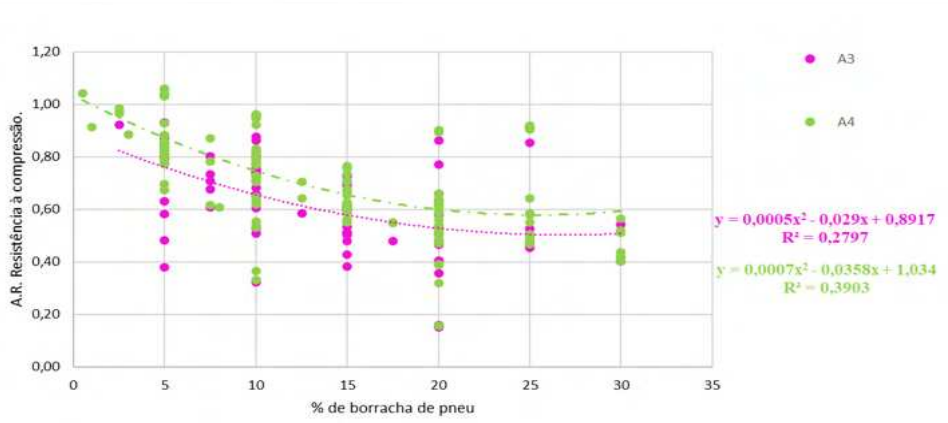


Figura 3 – A.R. da resistência à compressão em relação a quantidade (%) de borracha de pneus inseridas no concreto para agrupamentos de relação a/c.

Fonte: Autores (2021).

3.2 Equação de regressão linear múltipla

Na análise estatística da regressão com três variáveis, o valor obtido para o R-Quadrado foi de 0,457, indicando que a regressão explica 45,7% da variabilidade da resistência à compressão. Como o F de significância global foi menor que 0,05, pode-se concluir que pelo menos uma variável no modelo está relacionada com a variável dependente.

3 variáveis e amostra de 348 dados			2 variáveis e amostra de 169 dados		
	Coeficientes	valor-P		Coeficientes	valor-P
Interseção	1,168	0,000	Interseção	1,168	0,000
$T_{borracha}$	0,000	0,892	$B_{\%}$	-0,016	0,000
$B_{\%}$	-0,016	0,000	$R_{a/c}$	-0,496	0,000
$R_{a/c}$	-0,496	0,000		Coeficientes	valor-P

Tabela 2 – Teste F para significância da regressão com 3 variáveis (à esq.) e 2 variáveis (à dir.).

Fonte: Autores (2021).

Conforme tabela 02, apenas a porcentagem de borracha ($B_{\%}$) e a relação a/c ($R_{a/c}$) estão relacionadas com a variável dependente (valor-p<0,05). Desse modo, a regressão linear com os dados do tamanho da borracha ($T_{borracha}$) selecionados não foi validada pelo teste de valor-p e, portanto, foi retirada pelo critério de saída adotado. Isso se explica pela falta de homogeneidade dos critérios de tamanhos da borracha entre as pesquisas analisadas, que podem ter influência diferente a depender do agrupamento de tamanho a que pertence.

Com duas variáveis, a análise estatística de regressão das variáveis $B_{\%}$ e ($R_{a/c}$) explicaram ~57% da variabilidade de resistência à compressão, para amostra com 348 dados. O R-Quadrado ajustado teve valor semelhante de ~57%, maior que o obtido no modelo com 3 variáveis.

Conforme Tabela 2, pode-se concluir que as duas variáveis independentes do modelo estão relacionadas com a variável dependente, de modo a satisfazerem a escolha delas para a regressão. Assim, a equação de regressão com duas variáveis obtida é dada pela Equação 2:

$$\sigma_{AR} = 1{,}168 - 0{,}016B_{\%} - 0{,}496R_{a/c} \quad (2)$$

A regressão testou negativo para a normalidade, de modo similar as análises bidimensionais. Por isso, como parâmetro de tendência, a análise de regressão múltipla corroborou a influência inversa que a quantidade de borracha e a relação a/c têm sobre a resistência.

4 | CONCLUSÕES

A inserção da borracha de pneu nos concretos diminui a resistência à compressão, de modo que se deve ter atenção para que os traços de concretos com borracha tenham baixa relação a/c para diminuição da porosidade e melhora do desempenho mecânico.

Apesar da adoção das classes de agrupamento e do fator de ponderação entre propriedades físico-mecânicas do concreto com e sem borracha, a influência dos tipos de concretos necessita ser abordada de forma ampliada para a diminuição da variabilidade dos dados. No entanto, foi possível traçar a tendência do comportamento físico-mecânico do compósito cimentício com borracha.

Assim, as correlações encontradas mostraram a influência da inserção da borracha de pneu inservível no compósito cimentício, bem como a potencialidade de uso de uma *database* como ferramenta para a previsibilidade da resistência à compressão do concreto com inserção de materiais reutilizáveis.

REFERÊNCIAS

1. GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**., 73, p. 562–574, 2014.

2. 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.

3. HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. **Construction and Building Materials** 73, p. 195–204, 2014.

4. MOHAMMED, B. S.; HOSSAIN, K. M. A.; SWEE, J. T. E.; WONG, G. Properties of crumb rubber hollow concrete block. **Journal of Cleaner Production** 23, p. 57-67, 2012.

5. FARHAD, A. Mechanical Properties of Waste Tire Rubber Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28. 2016. p. 040151521-0401515214.

6. YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 665–672, 2013.

7. TORGAL, F. P.; DING, Y.; JALALI, S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p.714, 2012.

8. ALCAZAS, J. C. **Durabilidade dos compósitos cimentícios adicionados de borracha de pneus inservíveis**. 2018. Trabalho de Conclusão Final de Curso (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) - Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2018.

9. HOLMAN, J. P. Capítulo 3: Análise de Experimental Dados. Subitem: 3.8 The Gaussian or Normal Error Distribution. **Experimental Methods for Engineers**. 8ª edição. New York. The McGraw-Hill Companies, 2012.

10. RODRIGUES, S. C. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática), Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

11. GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. **Journal of Cleaner Production** 112, p. 702-711, 2016.

12. GIRSKAS, G.; NAGROCKIENĖ, D. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. **Construction and Building Materials**, v.140, p. 36-42, 2017.

13. MOHAMMED, B. S.; AZMI, N. J. Strength reduction factors for structural rubbercrete. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v.8, p. 270-281, 2014

14. GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; HANSU, O.; İPEK, S.; ASAAD, D. S. Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel–concrete bond strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p.1113–1121, 2015.

15. PINO, F. A. A questão da não normalidade: uma revisão. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 61, n. 2, 2014. p. 17-33.



CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES REOLÓGICAS E HIDRATAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTOS TERNÁRIOS CONTENDO RESÍDUOS DE MÁRMORE, PORCELANATO, BLOCO CERÂMICO E FOSFOGESSO

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108112

COSTA; ANA RITA DAMASCENO[1]; GONÇALVES; JARDEL PEREIRA[1].
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
E-MAIL DA AUTORA CORRESPONDENTE: RITA.DAMASCENO@UFBA.BR

RESUMO: Esse estudo avalia a influência da composição de cimentos ternários contendo resíduos sobre as suas propriedades reológicas e de hidratação. Como matérias-primas foram utilizados cimento Portland, fosfogesso e resíduos de mármore, porcelanato e bloco cerâmico. A área superficial específica das matérias-primas é o principal fator que governa o comportamento reológico das pastas. Seu incremento implica na redução da tensão de escoamento e viscosidade plástica. A variação da razão resíduo cerâmico/resíduo de mármore altera a cinética de hidratação nas primeiras 48 horas. As pastas são compostas principalmente por C-S-H, portlandita e etringita. Os resíduos cerâmicos, de mármore e fosfogesso podem ser utilizados como alternativas às matérias-primas naturais na produção de cimentos ternários.

PALAVRAS-CHAVES: Reologia, Hidratação, Resíduo cerâmico, Fosfogesso, Cimentos ternários.

ABSTRACT: This This study assesses the influence of the ternary cements composition containing waste materials on its rheological and hydration properties. As raw materials, Portland cement, phosphogypsum, and wastes of marble, clay brick, and clay tile were used. The raw materials specific area is the main factor that governs the pastes rheological behavior. Its increase implies a reduction of the yield stress and plastic viscosity. The variation of the ceramic waste/marble waste ratio changes the hydration kinetics in the first 48 hours. The pastes are mainly composed of C-S-H, portlandite, and ettringite. Ceramic, marble, and phosphogypsum wastes can be used as alternatives to natural raw materials in the production of ternary cements.

KEYWORDS: Rheology, Hydration, Ceramic waste, Phosphogypsum, Ternary cements.

1 | INTRODUÇÃO

A incorporação de materiais suplementares em cimentos alternativos tem um impacto significativo na fluidez de suas pastas, demandando um aumento do teor de água para atingir a mesma trabalhabilidade de misturas com cimento Portland convencional[(1)]. A trabalhabilidade dos cimentos ternários (CT) LC³ é governada pela argila calcinada, que retém a água reduzindo a interação efetiva entre a água e o aglomerante. O uso de calcário contendo quantidades ínfimas de componentes orgânicos aumenta significativamente a trabalhabilidade do sistema[(2)]. Ferreiro et al.[(3)] verificaram que argilas com relação molar SiO_2:Al_2O_3 equivalente a 1:1 aumentam a demanda de água nos CT quando comparadas às de relação 2:1 para alcançar uma

trabalhabilidade aceitável para a mesma dosagem de aditivo superplastificante.

A composição mineralógica das pastas de CT depende fundamentalmente da reatividade das argilas, teor de substituição, composição do cimento e idade[4]. O efeito da substituição parcial do Cimento Portland por argilas calcinadas altamente reativas na hidratação é uma combinação de um efeito filler, aumentando o grau de hidratação em idades precoces, e reação pozolânica das argilas calcinadas nas idades mais avançadas[5]. Argilas calcinadas favorecem a formação de fases do tipo hemi e monocarboaluminato e influenciam a microestrutura dos produtos de hidratação, aumentando o comprimento da cadeia C–A–S–H onde o alumínio passa a substituir o silício[5-6]. No entanto, não há estudos que demonstrem o efeito de matérias-primas residuais como alternativa a fontes naturais em sistemas ternários como o LC^3.

Dessa forma, o objetivo do presente estudo é avaliar a influência da composição de cimentos ternários contendo resíduos sobre as suas propriedades reológicas e de hidratação. Para tanto, foram produzidas amostras ternárias contendo cimento Portland, resíduo de porcelanato ou de bloco cerâmico, resíduo de mármore e fosfogesso. A análise tem como foco a variação tanto da fonte de argila calcinada (RP ou RBC), como a aplicação de diferentes razões resíduo cerâmico/resíduo de mármore.

2 | EQUAÇÕES, MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas nesse estudo foram cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP), quartzo (Q), fosfogesso (FG) e resíduos de mármore (RM), bloco cerâmico (RBC) e porcelanato (RP). O RCB foi material descartado de uma fábrica de blocos cerâmicos vermelhos, o RP foi de uma distribuidora de peças para revestimento de piso. A amostra foi de um único lote e modelo de placa de porcelanato esmaltado. O RM foi do tipo Bege Bahia, subproduto obtido em empresa de corte e fabricação de peças ornamentais. O fosfogesso foi um resíduo da produção de ácido fosfórico em uma indústria de fertilizantes. Os resíduos foram beneficiados por moagem em laboratório. As propriedades físicas das matérias primas são apresentadas na Tabela 1.

Propriedade	CP	RBC	RP	RM	FG
Massa específica (kg m^{-3})	3272	2814	2601	2781	2438
Área superficial específica BET (m^2 kg^{-1})	1301	9395	4540	9681	5119
D_{10} (µm)	1,87	0,77	0,83	0,73	1,37
D_{50} (µm)	11,6	3,14	3,14	3,69	7,98
D_{90} (µm)	34,08	10,20	8,61	15,33	32,05

Tabela 1 – Propriedades físicas das matérias-primas após o beneficiamento.

2.2 Produção e cura

A composição padrão do cimento LC^3 é de 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gipsita[7-9]. O teor de 0,72% de sulfato de cálcio

($CaSO_4$) do cimento (que produz 0,91% de gipsita quando em contato com a água) foi corrigido para manter o teor da fonte de $CaSO_4$ em 5%. Dois cimentos ternários foram produzidos com a dosagem padrão (Tabela 3) substituindo a argila calcinada por RBC (CT.RBC) e por RP (CT.RP). Foram produzidas duas amostras de referência. A primeira contendo o CP puro. A fim de avaliar a contribuição do efeito filler, foi determinada uma segunda amostra de referência (CP.Q) contendo quartzo como material inerte em igual teor ao dos MCSs no cimento ternário (resíduo cerâmico + RM).

Amostra	CP	RBC	RP	RM	Q	FG
CT.RBC	50,36	30,00	-	15,00	-	4,64
$CT.RBC_{II}$	50,36	35,17	-	9,83	-	4,64
CT.RP	50,36	-	30,00	15,00	-	4,64
$CT.RP_{II}$	50,36	-	39,36	5,64	-	4,64
CP.Q	50,36	-	-	-	45,00	4,64
CP	100	-	-	-	-	-

Tabela 3 – Composição dos cimentos ternários e amostras de referência (%).

O efeito da razão resíduo cerâmico/RM foi analisado para os CTs considerando a razão $CaCO_3/Al_2O_3$ não cristalino entre as matérias-primas. As frações mássicas de RBC ou RP para RM foram ajustadas, de modo que as razões molares de Al_2O_3 e $CaCO_3$ na fase amorfa de cada material permanecessem equivalentes a 1:1. A composição das amostras foi determinada usando o teor de $CaCO_3$ de 70,97% para o RM e um teor de alumina não cristalina dos resíduos de argila de 19,83% para o RBC e 10,17% para o RP. Portanto, a razão RBC/RM foi de 3,6 na primeira amostra ($CT.RBC_{II}$) e a razão RP/RM foi de 7,0 na segunda amostra ($CT.RP_{II}$). A mistura foi realizada com 500 g de material anidro e 275 g de água (a/c = 0,55). As amostras foram desmoldadas após 24 h da produção, em seguida submetidas à cura submersa em água sem aditivos e em ambiente com temperatura de 20 °C.

2.3 Mini-abatimento

O ensaio de mini-abatimento foi aplicado para estudar o efeito da composição dos cimentos ternários nas propriedades reológicas das pastas ao longo do tempo. O diâmetro de espalhamento foi registrado após a retirada do cone nos tempos de 5, 15 e 30 minutos após o primeiro contato do cimento com a água, permitindo avaliar a perda de abertura ao longo do tempo.

2.4 Reometria rotacional

Para analisar comparativamente os parâmetros reológicos das pastas dos cimentos ternários produzidos e composições de referência, foram realizados ensaios no viscosímetro modelo 3530 da *Chandler Engineering* de cilindros coaxiais, de acordo com a norma ABNT NBR 9831.

2.5 Calorimetria isotérmica

A calorimetria isotérmica foi realizada para avaliar a influência da composição na cinética de hidratação das pastas de cimentos ternários a 20 °C e durante as primeiras 72 h. Para tanto, foi utilizado um calorímetro isotérmico TAM Air de oito canais (*TA Instruments*).

2.6 Difração de raios X (DRX) e análise quantitativa pelo método de Rietveld

O DRX foi aplicado para identificar a composição mineralógica das pastas de cimentos ternários após 1, 3, 7, 28 e 91 dias de hidratação. As amostras foram analisadas em um difratômetro D8 Advance (Bruker AXS) (raio de 280 mm) com radiação Cu Kα (λ = 0,154 nm) a 21 °C. Foi aplicada a análise quantitativa pelo método de Rietveld utilizando-se o software GSAS II versão 3913, conforme metodologia descrita por Costa et al.[10].

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência da composição nas propriedades reológicas dos cimentos ternários

As pastas de CT indicaram maior conservação do espalhamento ao longo do tempo (Figura 1), tendo uma reduzida variação (≤ 23%) do espalhamento entre a medida inicial e a realizada aos 30 min. Tal comportamento foi ainda mais acentuado na pasta com RP (≤ 9%). As amostras com RP apresentaram diâmetros semelhantes independente da proporção resíduo cerâmico : mármore aplicada. As pastas de CT de modo geral indicaram espalhamentos menores quando comparadas ao PC, em média 13% menores para as CT.RP e 28% para as CT.RBC. Tal efeito pode estar relacionado à maior área superficial específica dos MCS.

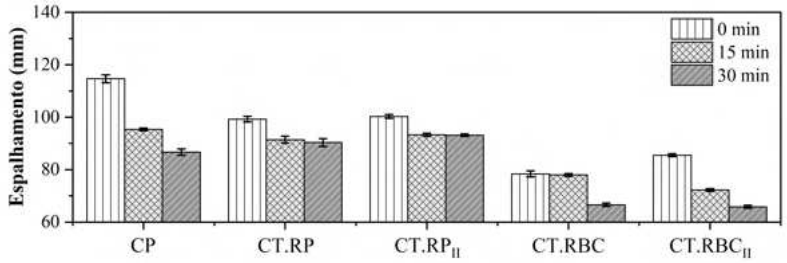


Figura 1 – Diâmetro de espalhamento das pastas ao longo do tempo.

A Figura 2 apresenta os parâmetros reológicos obtidos aplicando o modelo de Bingham para regressão das curvas de fluxo de cada pasta. As amostras com RBC apresentaram maiores tensões de escoamento. Tal efeito pode ser explicado pela elevada superfície específica do resíduo (cerca de duas vezes maior que a do RP), que aumenta a quantidade de água aderida aos grãos e reduz a água livre que aprimoraria o fluxo da mistura. Fazendo um comparativo entre os métodos de dosagem, é possível

observar que a dosagem convencional levou a maiores tensões de escoamento. Tal desempenho é justificado pela redução do teor de RM, uma vez que este apresenta a maior superfície específica. Quanto às viscosidades plásticas, de modo geral os valores seguem a mesma tendência das tensões de escoamento. A amostra CP.Q apresentou viscosidade intermediária às de CP e CT.

A diferença entre os valores de gel inicial e final indica a estabilidade das tensões de escoamento da pasta ao longo do tempo. As pastas CT apresentaram valores maiores quando comparadas às referências pastas PC, evidenciando a influência dos MCS sobre os parâmetros reológicos. As variações entre gel inicial e final foram maiores para as pastas com RP.

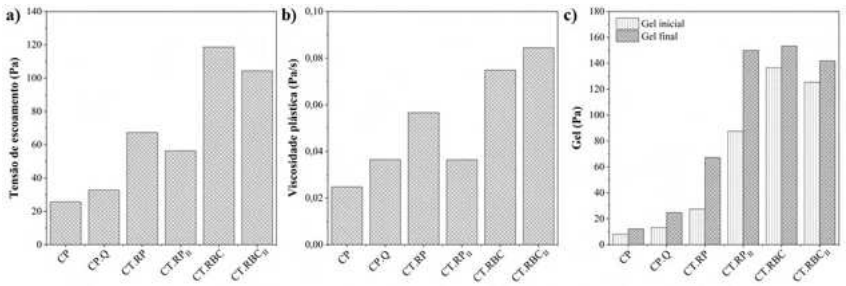


Figura 2 – Tensão de escoamento (a), viscosidade plástica (b) e força gel (c) das pastas cimentícias.

A propriedade física determinante sobre as propriedades reológicas das pastas é a área superficial específica[11]. Um incremento em seu valor tem como consequência um aumento do percentual de água aderida à superfície dos grãos e a redução da água livre, dificultando assim o fluxo da mistura. Tal relação é evidenciada na Figura 3. Foram atribuídos às pastas valores de área superficial específica média dos cimentos. Estes, foram calculados de acordo com a média ponderada das superfícies específicas individuais e os teores de cada matéria-prima na matriz.

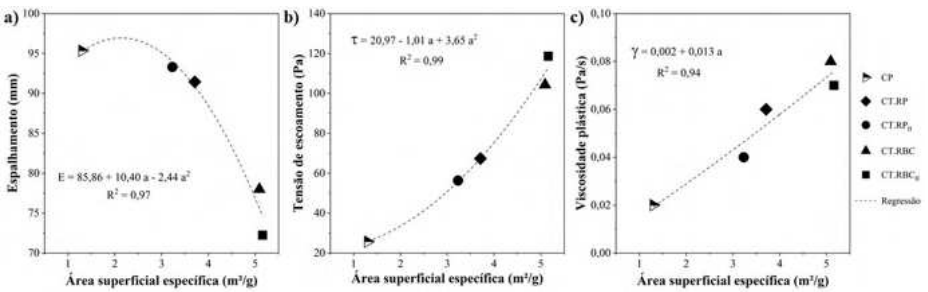


Figura 3 – Correlação entre as propriedades reológicas e a área superficial específica dos cimentos.

Os resultados sugerem uma correlação direta entre a redução do diâmetro de espalhamento e o incremento da área. Em razão das propriedades físicas das matérias-

primas, as pastas com RBC apresentaram menor trabalhabilidade. É possível observar uma correlação entre a área superficial e a tensão de escoamento e viscosidade plástica. A pasta de referência PC apresenta os maiores espalhamentos, menor tensão de escoamento, viscosidade plástica e gel inicial e final. O incremento de MCS nas pastas de CT aumenta a superfície específica e tem como consequência o comportamento inverso ao da pasta PC. Desempenho semelhante foi verificado por Favier et al.[2], Ferreiro et al.[3] e Perez et al.[12].

3.2 Influência da composição na hidratação dos cimentos ternários

Durante as reações iniciais as amostras de CT apresentam fluxo de calor maiores quando comparadas às referências (Figura 4). Tal efeito pode ser justificado pelo maior teor de íons Ca^{2+} oriundos das matérias-primas suplementares. O pico principal de hidratação ocorre por volta de 10 h após o início do ensaio e é atribuído à formação de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e etringita. A diferença entre o fluxo de calor das pastas PC e PC.Q indica a contribuição associada ao efeito filler.

As amostras CT apresentaram fluxo máximo de calor superiores ao da referência, indicando uma contribuição no processo de hidratação além do efeito filler. Deve se considerar, no entanto, que a contribuição da pasta com RP foi mínima e pode estar associada ao melhor empacotamento das partículas do cimento. O incremento do pico principal de hidratação está relacionado à maior formação de CH, C-S-H e etringita, sendo maior para o RBC, seguida das pastas com RP.

A evolução do calor acumulado é apresentada na Figura 4c. A alteração na composição dos MCS diferencia as curvas desde os minutos iniciais da hidratação. O calor total na reação de hidratação das amostras com RBC pouco variou entre as diferentes dosagens desse resíduo. Os dados sugerem que a alteração da proporção alumina : carbonato de cálcio não influenciou na cinética de hidratação entre 48 e 72 h. Por outro lado, as amostras com RP em 72 horas apresentaram calor acumulado cerca de 10% maior para a pasta $CT.RP_{II}$. Tal efeito pode estar associado à conversão da etringita em AFm nas últimas horas, como pode ser observado por um leve pico presente na curva de fluxo de calor.

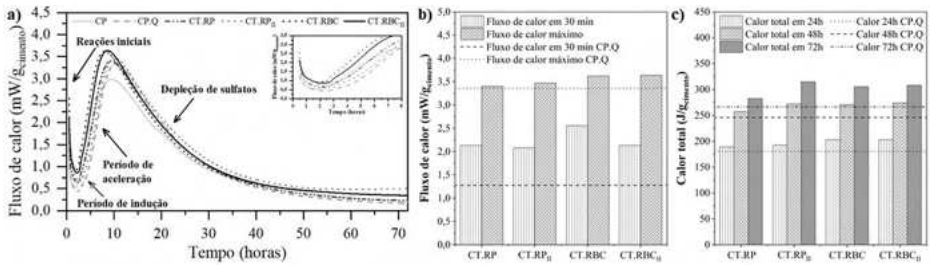


Figura 4 – Evolução do fluxo de calor (a), fluxo (b) e calor total (c) durante a hidratação das pastas.

A análise da calorimetria indica que as pastas de CT apresentaram formação de C-S-H e etringita um pouco maior no pico principal de hidratação. O incremento do fluxo de calor foi de no máximo 0,5 mW/g de cimento, sendo atribuído ao efeito de

nucleação gerado pela presença das partículas de menor dimensão. As amostras com RBC apresentaram maior taxa de hidratação quando comparada às de RP. As formulações com a dosagem não convencional (CT.RBC$_{II}$ e CT.RP$_{II}$) apresentaram uma diferença sutil (< 1,6%) nos dados de calor, não sendo o suficiente para confirmar uma contribuição além da justificada pelo melhor empacotamento das partículas.

A quantificação das principais fases da composição mineralógica das pastas determinada pelo método de Rietveld é apresentada na Figura 5. Para a pasta CP observa-se um aumento do teor de portlandita e etringita, bem como de fases não cristalinas. A principal fase amorfa identificada em pastas é o C-S-H. Tal desempenho é característico de cimentos de alta resistência inicial, que apresentam grande parte da formação de C-S-H nos primeiros dias de hidratação[13].

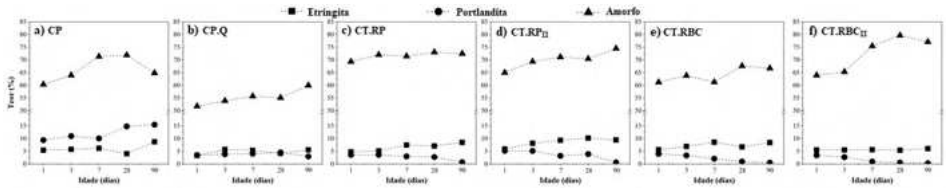


Figura 5 – Principais fases da composição mineralógica das pastas ao longo do tempo.

Para as pastas de CT observa-se um crescimento constante do teor de etringita associado ao aumento do teor de portlandita até os 7 dias, seguido de um decréscimo. Esse comportamento é atribuído ao consumo do hidróxido de cálcio na reação pozolânica e entre as pastas com RP é mais expressivo na CT.RP e nas com RBC é mais evidente na CT.RBC$_{II}$. Isso indica que a modificação da razão alumina : carbonato de cálcio foi vantajosa apenas para o RBC.

Para a pasta com quartzo (CP.Q), observa-se que o teor de portlandita e fases não cristalinas é crescente e está de acordo com o comportamento verificado na pasta de cimento sem substituições. O teor de portlandita aos 28 dias (4,54%) é expressivamente superior ao das pastas CT.RP (2,73%), CT.RP$_{II}$ (3,88%), CT.RBC (0,93%) e CT.RBC$_{II}$ (0,51%), indicando uma contribuição pozolânica dos MCS além do efeito filler.

4 | CONCLUSÕES

Com base nos resultados, as seguintes conclusões podem ser definidas:

A área superficial específica das matérias-primas é o principal fator que governa o desempenho reológico das pastas de cimentos ternários. Um incremento nessa propriedade física implica na redução da tensão de escoamento e viscosidade plástica, por outro lado o inverso é observado para o diâmetro de espalhamento.

As formulações de CT apresentaram uma diferença sutil nos dados de calor até as 72 h, não sendo o suficiente para confirmar uma contribuição além da justificada pelo melhor efeito de nucleação das partículas até esse tempo de hidratação.

A avaliação quantitativa sugere a ocorrência de reação pozolânica nas pastas a

partir dos 7 dias de hidratação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB, Bolsa nº 0289/2020) pelo apoio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa. Esse trabalho também foi patrocinado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Bolsa nº 88887.124147/2014-00) em uma parceria entre a UFBA, UFRGS e UNICAMP pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD).

REFERÊNCIAS

1. ZHANG, L. *et al.* Effect of polycarboxylate ether comb-type polymer on viscosity and interfacial properties of kaolinite clay suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science,** v. 378, n. 1, p. 222-231, 2012.

2. FAVIER, A. *et al.* The Effect of Limestone on the Performance of Ternary Blended Cement LC3: Limestone, Calcined Clays and Cement. In: **Calcined Clays for Sustainable Concrete.** Springer, Dordrecht, p. 170-175, 2018.

3. FERREIRO, S. *et al.* Influence of Clay Type on Performance of Calcined Clay–Limestone Portland Cements. In: **Calcined Clays for Sustainable Concrete.** Springer, Dordrecht, p. 176-182, 2018.

4. TIRONI, A. *et al.* Kaolinitic calcined clays–Portland cement system: Hydration and properties. **Construction and Building Materials,** v. 64, p. 215-221, 2014.

5. ALUJAS, A. *et al.* Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. **Applied Clay Science,** v. 108, p. 94-101, 2015.

6. PUERTA-FALLA, G. *et al.* Elucidating the role of the aluminous source on limestone reactivity in cementitious materials. **Journal of the American Ceramic Society,** v. 98, n. 12, p. 4076-4089, 2015.

7. ANTONI, M. *et al.* Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research,** v. 42, n. 12, p. 1579-1589, 2012.

8. DHANDAPANI, Y.; SANTHANAM, M. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. **Cement and Concrete Composites,** v. 84, p. 36-47, 2017.

9. MARAGHECHI, H. et al. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. **Materials and Structures,** v. 51, n. 5, p. 1-17, 2018.

10. COSTA, A. R. D. et al. Hydration of sustainable ternary cements containing phosphogypsum. **Sustainable Materials and Technologies,** p. e00280, 2021.

11. CLAISSE, P. A. et al. Workability of cement pastes. **ACI Materials Journal - American Concrete Institute,** v. 98, n. 6, p. 476-482, 2001.

12. PEREZ, A. et al. Influence of the Manufacturing Process on the Performance of Low Clinker, Calcined Clay-Limestone Portland Cement. In: **Calcined Clays for Sustainable Concrete.** Springer, Dordrecht, p. 283-289, 2015.

13. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª edição. São Paulo: Pini. 673 p, 2008.



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MOAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS PARA APLICAÇÃO COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108113

COSTA; ANA RITA DAMASCENO[1]; GONÇALVES; JARDEL PEREIRA[1].
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA (UFBA).
E-MAIL DA AUTORA CORRESPONDENTE: RITA.DAMASCENO@UFBA.BR

RESUMO: O presente estudo visa avaliar os parâmetros de moagem para o beneficiamento dos resíduos de mármore, porcelanato, bloco cerâmico e fosfogesso para reciclagem como materiais cimentícios suplementares. As matérias-primas foram beneficiadas por britagem, peneiramento e moagem em um moinho planetário de bolas variando os parâmetros de tempo e velocidade de rotação. Os resíduos foram caracterizados quantos às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. O estudo de moagem foi baseado na análise da distribuição de partículas por difração a laser. Os resíduos de porcelanato e bloco cerâmico apresentaram o melhor índice de moabilidade, atingindo diâmetros médios de cerca de 3 µm com as menores energias aplicadas. Os resíduos de mármore e fosfogesso indicaram tendência à aglomeração durante a moagem, demandando o uso de aditivos dispersantes e redução da velocidade de rotação.

PALAVRAS-CHAVES: Moagem, Resíduo de mármore, Resíduo cerâmico, Fosfogesso, Materiais cimentícios suplementares.

ABSTRACT: The present study aims to evaluate the milling parameters for the processing of marble, clay tile, clay brick, and phosphogypsum wastes for recycling as supplementary cementitious materials. The raw materials were benefited by grinding, sieving, and milling in a planetary ball mill, varying the parameters of time and rotation speed. The wastes were characterized according to their physical, chemical and mineralogical properties. The milling study was based on the analysis of particle size distribution by laser diffraction. The clay tile and clay brick wastes showed the best grindability indexes, reaching average diameters of about 3 µm with the lowest consumed energies. Marble and phosphogypsum wastes indicated a tendency to agglomerate during milling, demanding the use of grinding additive and reduced rotation speed.

KEYWORDS: Milling, Marble waste, Clay waste, Phosphogypsum, Supplementary cementitious materials.

1 | INTRODUÇÃO

Peças cerâmicas quebradas não são aceitas como produtos comerciais e não há meios altamente eficazes de descarte e reciclagem desse tipo de material(1). A quantidade de resíduos gerados nas diferentes fases de produção da indústria cerâmica europeia atinge 3-7% em peso da produção total de blocos cerâmicos vermelhos(2). É amplamente relatado que resíduos de blocos cerâmicos finamente moídos (RBC) podem ser usados como material pozolânico(3). Quando comparada com a argila calcinada

convencional, representa uma forma potencial de diminuir as emissões de CO_2 e os custos de produção[4].

A produção brasileira de mármore é estimada em 2 milhões de toneladas por ano[5]. Devido à sua composição, muitas vezes semelhante à do calcário, o RM geralmente é utilizado na produção de materiais de construção, diversos pesquisadores avaliaram suas propriedades quando incorporadas em sistemas cimentícios[6]. O fosfogesso (FG) é um material resíduo da produção de ácido fosfórico na indústria de fertilizantes e sua composição química principal é de $CaSO_4.2H_2O$. Estima-se que o Brasil produza anualmente cerca de 11,6 milhões de toneladas de FG[7].

Embora diversos estudos tenham abordado o uso de resíduos como alternativa às matérias-primas naturais em materiais cimentícios, ainda não há um consenso sobre os critérios de escolha dos parâmetros de beneficiamento desses subprodutos industriais. O presente estudo visa, portanto, avaliar os parâmetros de moagem para o beneficiamento dos resíduos de mármore, porcelanato, bloco cerâmico e fosfogesso para reciclagem como materiais cimentícios suplementares.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas nesse estudo foram fosfogesso (FG) e resíduos de mármore (RM), bloco cerâmico (RBC) e porcelanato (RP). O RCB foi material descartado de uma fábrica de blocos cerâmicos vermelhos. O RP foi proveniente de uma distribuidora de peças para revestimento de piso. A amostra foi de um único lote e modelo de placa de porcelanato esmaltado. O RM foi do tipo Bege Bahia, subproduto obtido em empresa de corte e fabricação de peças ornamentais. Esses resíduos consistiam em pedaços de 5 a 10 cm, que foram triturados em um britador de mandíbulas de laboratório I-4198 (Pavitest) e posteriormente peneirados em uma peneira padrão de 1,18 mm. O FG foi um resíduo da produção de ácido fosfórico em uma indústria de fertilizantes. O resíduo foi seco à temperatura ambiente e os torrões foram separados manualmente até que todos passassem por uma peneira padrão de 1,18 mm.

2.2 Estudo de moagem

Os resíduos foram beneficiados em um moinho de bolas planetário PM 100 (Retsch) equipado com um jarro de moagem de aço inoxidável de 500 cm^3. O RM foi moído sob velocidades de rotação de 300 rpm e 400 rpm, o RBC e RP sob 400 rpm e todos variando o tempo. O FG sob 300 rpm e variando o tempo de beneficiamento e teor de dispersante. O jarro de moagem foi carregado com 1600 bolas de aço inoxidável (φ = 5 mm) e 210 g de RBC, 195 g de RP, 208 g de RM ou 183 g de FG, que correspondem a proporções mássicas de esferas: pó de 3,8: 1, 3,9: 1 e 4,4: 1, respectivamente. Propilenoglicol também foi adicionado com um teor de 0,2% como um dispersante para evitar a aglomeração do RBC e RP nas esferas e contra as faces internas do jarro de moagem. Na moagem do RM foi aplicado 0,4%. Para o FG, variou-se o teor entre 0,2, 0,3, e 0,4% de propilenoglicol.

A granulometria dos resíduos após a moagem foi avaliada pela análise da

distribuição de partículas por difração a laser quantificada no equipamento modelo Mastersizer 3000 (*Malvern Instruments*). A energia específica de moagem foi calculada pela razão entre a energia consumida durante o beneficiamento no moinho e a massa de material produzida. O índice de moabilidade foi calculado pela razão entre a área superficial específica e a energia consumida pelo moinho durante o beneficiamento. A área superficial específica para cada cenário de moagem foi estimada com base na curva de distribuição de partículas[8].

2.3 Área superficial específica (BET)

A área superficial específica dos resíduos foi determinada por isotermas de fisissorção de nitrogênio a -196 °C usando equipamento ASAP 2020 (Micromeritics) e calculada pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET).

2.4 Análises termogravimétricas (TG/DTG)

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada em um analisador térmico DTG-60H (Shimadzu). Cerca de 10 mg das amostras em pó foram colocadas em cadinhos de alumina e analisadas de 25 °C a 1000 ° C, em atmosfera de ar sintético (20% O_2, 80% N_2), com vazão de 50 mL.min^{-1} e a uma taxa de aquecimento de 10 ° C.min^{-1}.

2.5 Difração de raios X (DRX) e análise quantitativa pelo método de Rietveld

O DRX foi aplicado para identificar a composição mineralógica dos resíduos após o beneficiamento por moagem. As amostras foram analisadas em um difratômetro D8 Advance (Bruker AXS) (raio de 280 mm) com radiação Cu Kα (λ = 0,154 nm) a 21 °C. Foi aplicada a análise quantitativa pelo método de Rietveld utilizando-se o software GSAS II versão 3913, conforme metodologia descrita por Costa et al.[9].

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Otimização dos parâmetros de moagem dos resíduos

3.1.1 Resíduo de mármore

As propriedades do RM durante e após o beneficiamento por moagem são apresentadas na Figura 1. Verifica-se que o consumo de energia aumenta com o tempo de moagem. O índice de moabilidade varia de forma expressiva em função da variação do tempo e velocidade (Figura 1). Embora as amostras com as condições 20min300rpm e 15min400rpm tenham consumido a mesma energia no beneficiamento, a primeira atingiu menores tamanhos de partículas. Desse modo, essa foi a condição escolhida para a avaliação na etapa de análise do potencial de uso do RM como MCS.

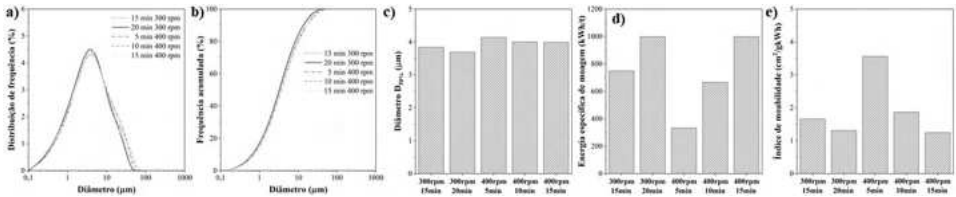


Figura 1 – Distribuição de partículas (a), frequência acumulada (b), diâmetro $D_{50\%}$ (c), energia específica de moagem (d) e índice de moabilidade (e) do resíduo de mármore após a moagem.

3.1.2 Resíduo de porcelanato

O tempo de moagem foi o fator preponderante na redução do tamanho de partículas do RP (Figura 2). O índice de moabilidade do material foi expressivamente menor quando comparado aos outros resíduos (Figura 2), em razão da dureza do material atingida pela recristalização dos argilominerais aluminossilicatos nas elevadas temperaturas de queima durante a produção do porcelanato. Esse comportamento indica que o resíduo apresenta alto consumo de energia durante o seu beneficiamento, reduzindo a sua viabilidade técnica quando comparado a outros resíduos de argilas calcinadas. A condição escolhida para a análise do potencial de uso do RP como MCS foi a de 30 min a 400 rpm, visando manter o diâmetro $D_{50\%}$ semelhante ao RM e ao de cimentos Portland (≈10 µm).

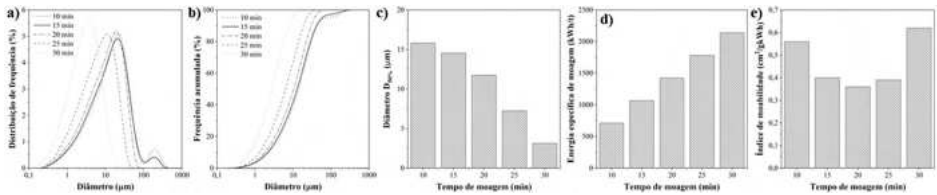


Figura 2 – Distribuição de partículas (a), frequência acumulada (b), diâmetro $D_{50\%}$ (c) e índice de moabilidade (d) do fosfogesso após a moagem.

3.1.3 Resíduo de bloco cerâmico

Na moagem do RBC o tempo foi a variável determinante até cerca de 15 min (Figura 3).

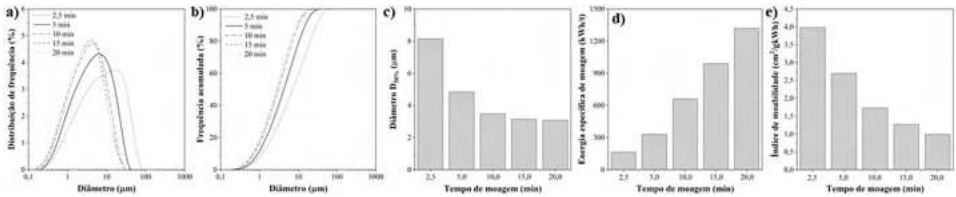


Figura 3 – Distribuição de partículas (a), frequência acumulada (b), diâmetro $D_{50\%}$ (c), energia específica de moagem (d) e índice de moabilidade (e) do resíduo de bloco cerâmico após a moagem.

A partir desse período, o tamanho das partículas tende a estabilizar, pouco variando o diâmetro $D_{50\%}$. Esse efeito é refletido na evolução do índice de moabilidade, para o qual ocorre pouca variação a partir dos 10 min, embora o consumo de energia na moagem tenha aumentado (Figura 3). A condição escolhida para avaliação do potencial de uso do RBC como MCS foi a de 15 min a 400 rpm, visando reduzir o consumo de energia no beneficiamento e garantir um diâmetro $D_{50\%}$ semelhante ao do RP.

3.1.4 Fosfogesso

A moagem do fosfogesso foi limitada pela forte tendência à aglomeração do material. Em cenários com velocidades ou tempos maiores que 300 rpm e 5 min, respectivamente, o resíduo adere às superfícies das esferas e das paredes do jarro de moagem, tornando-se uma peça única solidificada. Portanto, esses limites de velocidade e tempo foram fixados e foram aplicados diferentes teores de um aditivo dispersante (propilenoglicol) (Figura 4).

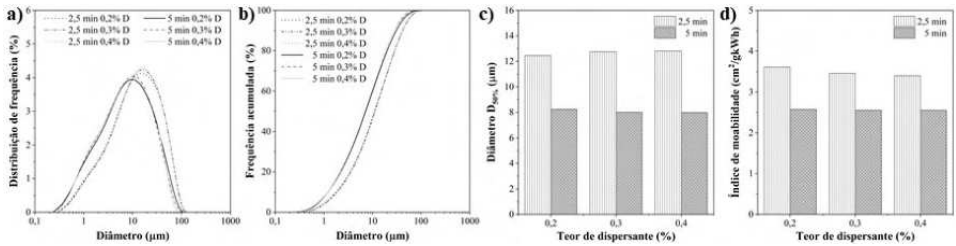


Figura 4 – Distribuição de partículas (a), frequência acumulada (b), diâmetro $D_{50\%}$ (c) e índice de moabilidade (d) do fosfogesso após a moagem.

Apenas as amostras submetidas a 5 min de moagem apresentaram $D_{50\%}$ menores que o estimado para um cimento Portland convencional (≈10 μm). Dentre essas, a condição de 0,4% de dispersante foi a escolhida para a etapa de análise do potencial de uso do FG como MCS, pois apresentou o menor $D_{90\%}$ (32,05 μm).

3.2 Análise do potencial de uso dos resíduos como materiais cimentícios suplementares

A Tabela 1 indica as propriedades físicas dos resíduos após o beneficiamento por moagem e considerando as condições ótimas escolhidas na etapa anterior. Todos os resíduos atingiram tamanho de partículas semelhantes ou menores que os estipulados para o cimento Portland convencional, bem como elevadas áreas superficiais específicas, indicando que cumprem os requisitos físicos para uso como MCS.

Propriedade	RBC	RP	RM	FG
Área superficial específica BET ($m^2\ kg^{-1}$)	9395	4540	9681	5119
D_{10} (μm)	0,77	0,83	0,73	1,37
D_{50} (μm)	3,14	3,14	3,69	7,98
D_{90} (μm)	10,20	8,61	15,33	32,05

Tabela 1 – Propriedades físicas das matérias-primas.

A Tabela 2 apresenta a composição química das matérias-primas obtidas por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) usando um instrumento S8 Tiger (Bruker).

Material	CaO	SiO_2	MgO	SO_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	Outros	PF
RBC	0,09	64,79	1,29	0,04	20,86	6,55	3,43	0,94	0,11	0,11	0,67	1,12
RP	1,29	65,02	0,98	0,03	20,23	4,60	2,16	0,51	0,06	3,06	1,99	0,07
RM	49,03	4,53	3,71	0,04	0,45	0,27	0,07	0,03	0,01	n.d.	0,11	41,75
FG	33,02	1,10	0,02	40,43	0,11	0,48	49 ppm	0,68	0,73	n.d.	1,09	22,34

Tabela 2 – Composição de óxidos das matérias-primas (%).

A composição mineralógica das matérias-primas foi identificada por TG/DTG/DTA e DRX/Rietveld (Figura 5). O RBC apresenta uma perda ao fogo de 1,09% na faixa de 25 °C e 100 °C devido à perda de água livre. A constância da massa durante a análise indica uma queima eficiente do bloco cerâmico na indústria. Isso significa que todos os minerais de argila da matéria-prima atingiram a temperatura de desidroxilação durante a queima. O mesmo ocorre para o resíduo de porcelanato. O FG tem uma perda de massa de 20,03% na faixa de temperatura de 100 °C e 190 °C devido à temperatura de desidratação da gipsita ($CaSO_4.2H_2O$) e da brushita ($CaHPO_4.2H_2O$). O RM apresenta uma perda de massa na faixa de 500 °C a 800 °C atribuída à descarbonatação da calcita ($CaCO_3$) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$)[10].

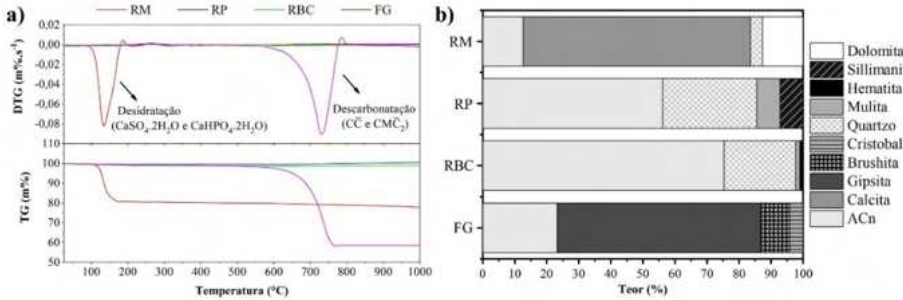


Figura 5 – Composição mineralógica dos resíduos obtida por TG/DTG (a) e DRX/Rietveld (b).

Com relação ao DRX, o PG apresenta gipsita e brushita que também foram identificados nos resultados de TG. O RBC apresenta um teor significativo de fases amorfas (75%). A queima da argila a 850 °C causa a desidroxilação dos argilominerais e promove uma desordem estrutural das fases resultando em fases amorfas[11]. O quartzo é um material adicionado pela indústria cerâmica para melhorar a estabilidade térmica e dimensional do bloco cerâmico[12]. A diferença entre o teor de SiO_2 total, identificado pelo FRX, e o teor de quartzo, quantificado por DRX/Rietveld, fornece o teor de dióxido de silício no argilomineral. Para o RBC, por exemplo, 64,79% de SiO_2 foi detectado por FRX e 22,35% de quartzo foi detectado por DRX/Ritveld. Em outras palavras, o teor de SiO_2 no argilomineral desse resíduo de argila é de 42,44%. Como o teor de Al_2O_3 é de 20,86%, uma relação Al_2O_3/SiO_2 de aproximadamente 2,0 é identificada, a qual está associada à presença de montmorilonita. Para o RP, essa proporção é de 1,8, sugerindo a presença de argilominerais nas proporções de 1:1 (caulinita) e 2:1 (montmorilonita).

O RM apresenta cerca de 56% de carbonatos. Com base na descarbonatação da calcita e dolomita, é possível estimar na análise TG que as perdas de massa dessas fases são de 20,87% e 4,03%, respectivamente. A diferença da perda de massa estimada (24,90%) e da perda de massa obtida pelo TG (41,49%) deve-se ao carbonato de cálcio amorfo que não é verificado nos difratogramas de DRX. Considerando que o conteúdo amorfo de WM (41,40%) é $CaCO_3$, a perda de massa devido à descarbonatação seria de 43,18%, o que indica que ambas as técnicas, TG e DRX, indicaram resultados semelhantes.

O grau de cristalinidade é um fator fundamental para a classificação dos resíduos cerâmicos (RBC e RP) como MCS. Minerais argilosos em sua forma bruta não apresentam atividade pozolânica. No entanto, ao serem calcinadas acima da temperatura de desidroxilação, há um aumento da desordem estrutural, um incremento da reatividade do material e, consequentemente, o desenvolvimento do potencial pozolânico[13]. O teor de amorfo reflete, portanto, a reatividade pozolânica do resíduo cerâmico como MCS. Argilas calcinadas de modo geral apresentam elevado teor de fases não cristalinas (10 a 60%)[14-15].

Observa-se também que os resíduos com composição mineralógica de fases formadas em temperaturas mais elevadas estão associados a maior demanda de energia específica de moagem e menores índices de moabilidade. O RP, por exemplo, é a amostra na qual esse efeito foi mais expressivo. A fração cristalina do resíduo é

essencialmente composta por mulita e sillimanita, que possuem temperaturas de formação de no mínimo 1200 e 1400 °C, respectivamente, conferindo maior energia de ligação e, portanto, maior dureza ao material.

Considerando os critérios de propriedades físicas e composição mineralógica, os resíduos estudados apresentam potencial de aplicação como MCS. O FG pode ser utilizado como matéria-prima alternativa à gipsita natural. Os resíduos RBC e RP como alternativa às argilas naturais, sendo o primeiro mais indicado devido ao menor consumo de energia para o beneficiamento por moagem. O RM moído possui potencial para uso como alternativa ao filler calcário em materiais cimentícios.

4 | CONCLUSÕES

Com base nos resultados, as seguintes conclusões podem ser definidas:

O índice de moabilidade é um fator determinante na otimização dos parâmetros de moagem, permitindo avaliar não apenas o tamanho de partículas obtido para cada condição, mas também considerando o grau de aumento da área superficial específica e o consumo de energia durante a moagem.

O beneficiamento dos resíduos em moinho de alta energia foi efetivo na redução do tamanho das partículas, atingindo as proporções requeridas para o uso como MCS. Os resíduos com composição mineralógica de fases formadas em temperaturas mais elevadas estão associados a maior demanda de energia específica de moagem e menores índices de moabilidade.

O resíduo de mármore do tipo bege Bahia apresenta composição mineralógica semelhante ao do calcário comercial e as propriedades físicas podem ser atingidas através da moagem. Os resíduos de bloco cerâmico e de porcelanato apresentam potencial de uso como MCS em substituição às argilas naturais calcinadas, embora o RP demande maior energia durante o beneficiamento por moagem.

O fosfogesso analisado possui potencial de uso como alternativa à gipsita natural em materiais cimentícios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB, Bolsa nº 0289/2020) pelo apoio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa. Esse trabalho também foi patrocinado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Bolsa nº 88887.124147/2014-00) em uma parceria entre a UFBA, UFRGS e UNICAMP pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD).

REFERÊNCIAS

1. LAVAT, A. E. *et al.* Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. **Waste management,** v. 29, n. 5, p. 1666-1674, 2009.

2. PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials,** v. 24, n. 5, p. 832-838, 2010.

3. ZHAO, Y. *et al.* The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production,** v. 242, p. 118521, 2020.

4. TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Research,** v. 37, n. 9, p. 1357-1365, 2007.

5. CHIODI FILHO, C. **O setor brasileiro de rochas ornamentais.** Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS, 2018.

6. KABEER, K. S. A.; VYAS, A. K. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. **Construction and Building Materials,** v. 165, p. 321-332, 2018.

7. DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). **Sumário Mineral,** 2015. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015.

8. DAMINELI, B. L. *et al.* Viscosity prediction of cement-filler suspensions using interference model: A route for binder efficiency enhancement. **Cement and Concrete Research,** v. 84, p. 8-19, 2016.

9. COSTA, A. R. D. *et al.* Hydration of sustainable ternary cements containing phosphogypsum. **Sustainable Materials and Technologies,** p. e00280, 2021.

10. RAMACHANDRAN, V. S. *et al.* **Handbook of thermal analysis of construction materials.** Noyes Publications / William Andrew Publishing, New York, 2002.

11. SABIR, B. B. *et al.* Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and concrete composites,** v. 23, n. 6, p. 441-454, 2001.

12. ARSENOVIC, M. *et al.* Clay brick walls thermal properties. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies,** v. 2, n. 1, p. 15-18, 2010.

13. TEKLAY, A. *et al.* Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. **Cement and Concrete Research,** v. 61, p. 11-19, 2014.

14. AVET, F. *et al.* Determination of the amount of reacted metakaolin in calcined clay blends. **Cement and Concrete Research,** v. 106, p. 40-48, 2018.

15. HOLLANDERS, S. *et al.* Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. **Applied Clay Science,** v. 132, p. 552-560, 2016.

EFEITO DA SÍLICA ATIVA NA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO ATRAVÉS DO MÉTODO ACELERADO EM BARRAS DE ARGAMASSAS

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108114

CRUZ DA SILVA ARAUJO; JULIENE[1]; PEREIRA BONFIM; FRANCIRENE[2]; PEREIRA GOUVEIA; FERNANDA[3]
[1,2,3]UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ -UFPA/CAMTUC
JULLIENE.SILVA@HOTMAIL.COM[1]; FRANCY_PB@HOTMAIL.COM[2]; GOUVEIA@UFPA.BR[3]

RESUMO: Umas das manifestações patológicas recorrentes nos elementos estruturais de concreto, a exemplo das fissuras, são provenientes de reações álcali-agregado (RAA). Uma das técnicas utilizadas para minimização dessa reação química é a utilização de adições minerais. Desta forma, este estudo tem o objetivo mitigar a RAA do agregado seixo rolado com a utilização da sílica ativa com teores de 8%, 10% e 12 % em substituição parcial ao cimento Portland. A avaliação da reação álcali-agregado foi realizada através do m*étodo ac*elerado em barras de argamassas. Os resultados mostraram o teor de 8 % de sílica ativa mitigou a RAA.

PALAVRAS-CHAVES: Adição mineral, reação álcali-agregado, sílica ativa.

ABSTRACT: One of the recurrent pathological manifestations in the elements, like fissures, comes from alkali-aggregate reactions (AAR). One of the techniques used to minimize this chemical reaction is the use of mineral additions. Thus, this study aims to mitigate the AAR of the pebble aggregate with the use of silica fume with contents of 8%, 10% and 12% in partial replacement to Portland cement. The evaluation of the alkali-aggregate reaction was carried out using the accelerated method in mortar bars. The results induced the 8% silica fume content mitigated an RAA.

KEYWORDS: Mineral addition, alkali-aggregate reaction, silica fume.

1 | INTRODUÇÃO

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um processo químico que ocorre no concreto endurecido, no qual os minerais reativos dos agregados reagem com hidróxilos alcalinos presentes nas soluções dos poros da pasta do concreto, formando um gel higroscópico expansivo, sendo este ocasionado por diversos fatores: uso de agregado reativo ou potencialmente reativo, álcalis do cimento, presença de umidade, temperatura e o consumo elevado do cimento (OTOCH, 2016)(1). Nesse contexto, Neville (2016)(2) explica que o resultado dessa reação é a formação de um gel álcali-silicato com características expansivas, que além do aumento de volume dos agregados, ocasionam desagregação e fissuração nas pastas cimentícias.

Entre as formas para inibir ou prevenir a RAA tem-se a redução do consumo de cimento e o uso de adições minerais em substituição ao cimento Portland (OTOCH, 2016) (3). As adições minerais possuem partículas extremamente finas que quando adicionadas

ao concreto atuam na melhoria de suas propriedades, como redução da porosidade, e consequentemente na melhoria da resistência e da durabilidade (GRUBBA, 2016)[4]. Além disso, Andrade (2017)[5] ressalta que o uso de adições minerais na composição dos materiais de construção contribui na diminuição dos impactos ambientais, pois esta é uma forma de aproveitar os resíduos poluidores que são provenientes de processos industriais, a exemplo da sílica ativa, cinzas volantes, escória granulada de alto forno, metacaulim, etc.

Pesquisas mostram resultados satisfatórios quanto ao uso de adições minerais em misturas cimentícias, a exemplo dos estudos de Menéndez *et al.* (2020)[6], no qual verificaram que a produção de argamassas compostas com pozolana natural, cinza volante, sílica e escória de alto forno foram eficazes na inibição da RAA. No que se refere ao uso de sílica ativa, os estudos de Tigre *et al*.[7] mostraram que o uso de sílica ativa no teor de 8 % em barras de argamassas com areia natural apresentou menores expansões por álcali-agregado quando comparados à mistura de referência. Outras vantagens do uso da sílica ativa são aumento da resistência à compressão axial, redução da permeabilidade e diminuição do calor de hidratação (SHAHMANSOURI *et al*.; TAVARES *et al*., 2020; TAN *et al*., 2020)[8] [9] [10].

Logo, percebe-se o potencial efeito do uso das adições minerais no preparo de misturas cimentícias, pois além das vantagens no que se refere às propriedades do concreto, também apresentam um elevado ganho ambiental devido o menor consumo dos recursos naturais não renováveis e a diminuição da emissão de CO_2 ocasionada na produção do clínquer. Desta forma, esta pesquisa buscar avaliar os efeitos da sílica ativa no combate a RAA em barras de argamassas.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e Métodos

No procedimento experimental realizado em laboratório, os materiais utilizados foram: Cimento CP II F-32 da marca Nassau, Sílica Ativa (SA) proveniente da produção do ferro silício da empresa Dow localizada no munícipio de Breu Branco-PA, o seixo rolado nº 3 proveniente da jazida Nova Esperança no munícipio de Breu Branco-PA e água. A Tabela 1 apresenta as características do cimento, SA e do seixo rolado.

Ensaios	Resultado	Método
	Seixo rolado nº 3	
Diâmetro máximo (mm)	38	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de Finura (%)	7,71	ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica g/cm³	2,78	ABNT NBR NM 53:2009
Absorção de água (%)	1,09	ABNT NBR NM 53:2009
Massa Unitária (g/cm³)	1,49	ABNT NBR NM 45:2006
	Cimento	

Perda ao Fogo (%)	11	ABNT NBR NM 18:2012
Material retido na peneira 45 µm (%)	1,27	ABNT NBR 15894-3:2010
Massa específica g/cm³	3,12	ABNT NBR 16605:2017
	SA	
Teor de Umidade (%)	0,57	ABNT NBR NM 24:2015
Perda ao Fogo (%)	6	ABNT NBR NM 18:2012
Material retido na peneira 45 µm (%)	26,02	ABNT NBR 15894-3:2010
Massa específica (g/cm³)	2,18	ABNT NBR 16605:2017
Atividade Pozolânica aos 7 dias (%)	111	ABNT NBR 5752:2014

Tabela 1 - Características do seixo rolado, Cimento e Sílica ativa

Fonte: Próprio Autor

A sílica ativa utilizada foi o material passante na peneira de 75 µm. A avaliação do agregado e a análise da influência da sílica ativa em substituição ao cimento quanto a RAA foram realizadas de acordo com a ABNT NBR 15577:2018[11] - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. As amostras foram coletadas e preparadas de acordo a ABNT NBR 15577-2: 2018[12].

O seixo rolado foi cominuído na máquina de abrasão Los Angeles e separado em frações granulométricas padronizadas pela ABNT NBR 15577-4: 2018[13] conforme apresenta a Tabela 2.

Peneira com abertura em Malha		**Quantidade de Material em Massa**	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Tabela 2 – Frações granulométricas do seixo rolado após cominuição

Fonte: ABNT NBR 15577-4 (2018)

Foram moldadas doze barras de argamassa, sendo três barras contendo apenas cimento como aglomerante e nove barras com SA em substituição parcial ao cimento (três barras para cada um dos seguintes teores: 8%, 10% e 12 %). Após a moldagem, as barras foram submetidas à cura úmida por 24 h, e após a desmoldagem as barras foram submersas em água aquecida até 80 ºC em banho-termorregulador por 24 h.

Em seguida, as barras de argamassas foram retiradas do banho-termorregulador e

submersas em câmara térmica com solução de hidróxido de sódio (NaOH 1N) e mantidas por um período de 28 dias, e nesse período foram realizadas leituras obrigatórias nas idades de 16 dias e 30 dias contados a partir da moldagem e três leituras intermediárias em cada período. As variações de comprimento das barras de argamassas foram determinadas por meio de um relógio comparador em um equipamento constituído de uma barra padrão para verificação do comparador de comprimento. A Figura 1 apresenta o processo de execução do ensaio de RAA.



Figura 1 - Etapas execução do ensaio. a) barras no banho-termorregulador; b) barras na câmara com solução de hidróxido e c) leitura do comprimento das barras de argamassas

Fonte: Próprio Autor

A classificação da reatividade potencial do agregado foi realizada de acordo com a ABNT NBR 15577-1: 2018 [(14)] que estabelece os seguintes limites para a expansão média das barras aos 30 dias:

a) Potencialmente inócuo (grau R0) menor que 0,19 %;

b) Potencialmente reativo (grau R1) entre 0,19 e 0,40 %;

c) potencialmente reativo (grau R2) entre 0,41 e 0,60 % ;

d) potencialmente reativo (grau R3) maior que 0,60 %.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Figura 2 apresenta o gráfico com os resultados das expansões das barras de argamassa compostas por cimento e sílica ativa.

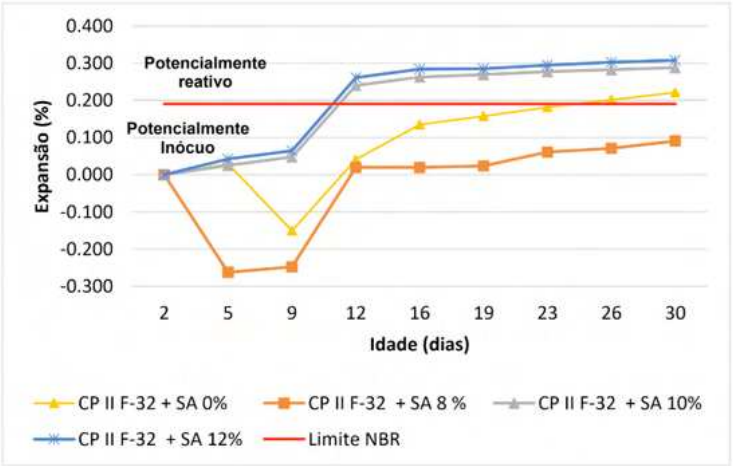


Figura 2 - Resultado das expansões por RAA

Fonte: Próprio Autor

Por meio da análise do gráfico da Figura 2 verificou-se que as barras de argamassa contendo sílica ativa no teor de 8 % auxiliaram na redução da reatividade, quando comparado com as barras de referência (sem adição), ocorrendo tal comportamento em todas as idades, sendo que até ao 12º dia as barras sofreram retração, e após essa idade ocorreu expansão, porém aos 30 dias a amostra não apresentou reatividade, classificando-se como potencialmente inócuo (grau R0). Já os teores de 10% e 12% de sílica ativa não foram eficazes no combate a reação álcali-agregado, apresentando expansão maior que a amostra de referência em praticamente todas as idades.

Nesse contexto, Ribeiro e Rey (2017)[15] explicam que a sílica ativa quando utilizada em excesso pode resultar em comportamento inverso, ou seja, o aumento da RAA, devido sua característica amorfa e consequentemente reativa, no qual pode provocar uma saturação desse material na solução intersticial dos poros da matriz cimentícia. Ainda segundo os autores, isso ocorre porque parte da sílica ativa reage com o $Ca(OH)_2$ como um material pozolânico, e a parte em excesso ficará disponível para reagir com os álcalis que não foram incorporados na estrutura do C-S-H. Desta forma, possivelmente esse foi o comportamento apresentado com o uso dos teores de 10% e 12% de SA em substituição ao cimento, que apresentaram expansões maiores que a amostra sem adição de sílica.

Costa *et al*. (2019) [16] também explica que a quantidade necessária da adição mineral para controlar a reação expansiva depende do tipo de adição utilizada, do grau de reatividade do agregado e a quantidade de álcalis presentes nos poros da matriz cimentícia. Entretanto, os resultados encontrados foram contrários aos observados por Nagrockienė *et al*. (2019) [17], no qual verificaram que conforme se aumentou o teor de sílica ativa, menor foi a expansão das barras de argamassa.

4 | CONCLUSÃO

A partir desta pesquisa verificou-se o seixo rolado sem o emprego de adição mineral apresenta-se como potencialmente reativo, tornando-se inadequado para o emprego na produção de concreto, principalmente obras de grande porte em que se utilizam o concreto massa. No que se refere às barras de argamassa contendo sílica ativa, o teor de 8 % de adição se mostrou eficaz na mitigação da reação expansiva, tornando o agregado inócuo. Porém os demais teores de 10% e 12 % apresentaram maior expansão que às amostras de referência, caracterizando-se como potencialmente reativo grau 1, comportamento não esperado. Desta forma, torna-se necessário avaliar em estudos posteriores o uso da sílica ativa, proveniente do processo de produção do ferro silício da empresa Dow, em diferentes teores combinados com outros tipos de cimento e agregados.

Ressalta-se a importância do uso de adições minerais pozolânicas na produção de concreto para evitar a formação de patologias nos elementos estruturais, a fim do aumento da segurança e durabilidade estrutural. Vale citar, que o uso de adições além da contribuição técnica de melhoria das propriedades dos materiais cimentícios, permite construções mais econômicas e sustentáveis devido à redução do consumo de cimento na mistura e os benefícios ambientais através do uso de resíduos que seriam dispostos na natureza.

REFERÊNCIAS

1. OTOCH, Sérgio. **Reação álcali-agregado: o que é e como evitar?** Concreto e Construções. IBRACON. Ano XLIV 83. 2016. ISSN 1809-7197.

2. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.

3. OTOCH, Sérgio. **Reação álcali-agregado: o que é e como evitar?** Concreto e Construções. IBRACON. Ano XLIV 83. 2016. ISSN 1809-7197.

4. GRUBBA, C. R. P. D. **Materiais de Construção: Para Gostar e Aprender.** Recurso Didático Digital. Versão 2.2 (2016).

5. ANDRADE, D. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, 0004/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 319p., 2017.

6. MENÉNDEZ, E.; SANJUÁN, M. Á.; GARCÍA-ROVES, R.; ARGIZ, C.; RECINO, H. Sustainable and Durable Performance of Pozzolanic Additions to Prevent Alkali-Silica Reaction (ASR) Promoted by Aggregates with Different Reaction Rates. **Applied Sciences,** v. 10, n. 24, p. 9042, 2020.

7. TIGRE, G.; GOUVEIA, F.; GUIMARÃES, B.; FROZ, F. Avaliação de Reação Álcali-Agregado da Areia Natural do Município De Tucuruí-Pa. **Anais 15 º Congresso Internacional de Patologia e Recuperação de estruturas (CINPAR)**, 2019.

8. SHAHMANSOURI, A. A.; YAZDANI, M.; GHANBARI, S.; BENGAR, H. A.; JAFARI, A.; GHATTE, H. F. Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite. **Journal of Cleaner Production**, 279, 123697, 2020.

9. TAVARES, L. R. C.; JUNIOR, J. F. T.; COSTA, L. M.; BEZERRA, A. C. S.; CETLIN, P. R.; AGUILAR, M. T. P. Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. **Scientific Reports,** v. 10, n. 1, p. 1-15, 2020.

10. TAN, Y.; YU, H.; SUN, S.; WU, C.; DING, H. Properties and microstructure of basic magnesium sulfate cement: Influence of silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121076, 2020.

11. 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.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-2**. Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2018.

13. 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.

14. 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.

15. RIBEIRO, D. V.; REY, R. O. Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Álcalis-Agregado (RAA). **Revista ALCONPAT,** Volume 9, Número 2 (maio – agosto 2019): 185 – 199.

16. COSTA, L. C. **Avaliação da reatividade de rochas vulcânicas do Rio Grande do Sul e da utilização de finos de britagem na mitigação da reação álcali agregado**. Dissertação. Complexo de Ensino Superior Meridional. Passo fundo/RS 2019.

17. NAGROCKIENĖ, D.; RUTKAUSKAS, A.; PUNDIENĖ, I.; GIRNIENĖ, I. The Effect of Silica Fume Addition on the Resistance of Concrete to Alkali Silica Reaction. **In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012031.



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MOAGEM DO RESÍDUO DE FCC NA HIDRATAÇÃO INICIAL DO CIMENTO POR CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108115

OLIVEIRA; JOSINORMA SILVA DE[1]; ANDRADE; HELOYSA MARTINS CARVALHO[1], GONÇALVES; JARDEL PEREIRA[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, CENTRO INTERDISCIPLINAR DE ENERGIA E AMBIENTE.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: JOSINORMA.ESA@GMAIL.COM

RESUMO: Este trabalho avalia a influência da moagem em moinho de bolas planetário em diferentes tempos, nas propriedades físicas, química e minerológicas de um resíduo oriundo do processo de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC). As pastas foram preparadas, substituindo 15% a massa de cimento pelo resíduo. A relação água/sólidos foi de 0,5. O processo de hidratação foi avaliado por calorimetria isotérmica durante os primeiros três dias de hidratação. A caracterização das pastas também foi avaliada por TG/DTG. Os resultados mostraram que a moagem do resíduo melhora sua reatividade nas pastas cimentícias, favorecendo não só a atividade pozolânica, como também a ação nucleante.

PALAVRAS-CHAVES: Moagem, Ecat, hidratação, calorimetria, análise térmica.

ABSTRACT: This work evaluates the influence of milling in a planetary ball mill at different times, on the physical, chemical and mineralological properties of a residue from the Fluidized Catalytic Cracking (FCC) process. The pastes were prepared, replacing 15% of the cement mass with the residue. The water/solids ratio was 0.5. The hydration process was evaluated by isothermal calorimetry during the first three days of hydration. Paste characterization was also evaluated by TG/DTG. The results showed that the milling of the residue improves its reactivity in cementitious pastes, favoring not only pozzolanic activity, but also nucleating action.

KEYWORDS: Milling, Ecat, hydratation, calorimetry, thermal analysis.

1 | INTRODUÇÃO

Durante o processo de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC), as refinarias de petróleo utilizam catalisadores zeolíticos com elevado teor de sílica e alumina com a finalidade de produzir derivados de maior valor agregado, como a gasolina. Com o uso contínuo, esses catalisadores diminuem sua eficiência sendo parcialmente substituídos por novos, gerando assim um rejeito, comumente denominado catalisador de equilíbrio (Ecat). Com a crescente demanda pelos subprodutos do petróleo, cresce também a geração deste resíduo [1].

Os trabalhos com uso do resíduo de FCC em pastas de cimento tem sido desenvolvidos com o Ecat original não moído[2–5]. Nestas aplicações a ação pozolânica é favorecida quando o aditivo tem faixa de tamanhos de partículas próxima à do cimento,

o que permite uma melhor mistura e maior contato com os produtos de hidratação [6]. Estudos envolvendo a influência do tamanho das partículas de outros materiais pozolânicos foram realizados por Zhao et al. [7], em que avaliaram a influência da moagem em diferentes períodos nas características pozolânicas das cinzas volantes de leito fluidizado circulante (CFA) e perceberam que a atividade de reação pozolânica do CFA moído foi aprimorada com o aumento do tempo de moagem a partir dos resultados experimentais do calor de hidratação.

Neste contexto, o presente estudo tem o propósito de verificar a influência do tamanho das partículas do Ecat, após ser moído por tempos diferentes, nas etapas iniciais de hidratação de um cimento Portland classe especial para poços de petróleo, através das técnicas de calorimetria isotérmica e termogravimetria (TG e DTG). A estratégia de utilizar este tipo de cimento, se deve ao fato, deste ser composto basicamente por clínquer e gipsita, permitindo o estudo da influência de sua substituição pelo Ecat, sem que haja interferência de outros materiais agregados.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo (Ecat) foi proveniente de uma refinaria de petróleo brasileira. Foi utilizado o Cimento Portland para Poços de Petróleo (CPP), regulamentado pela NBR 9831/08[8]. Foi realizado um estudo de moagem, para definir os melhores parâmetros (frequência de rotação, diâmetro das esferas, teor de dispersante e tempo de moagem), em um moinho de bolas planetário (*PM 100*). As moagens foram realizadas a seco em frasco de 500 mL, o volume de amostra fixado em 75 mL, deixando livre um terço do volume do frasco, conforme recomendações do fabricante [9].

O cimento (CPP) e todas as amostras de Ecat tiveram a granulometria determinada através de um difratômetro a laser (*Mastersizer 3000*). A massa específica foi medida através de um picnômetro (*Micromeritics AccuPyc II 1340*). A composição química foi determinada por fluorescência de raio-X (*S8-Tiger da Bruker*). As fases cristalinas por difração de raios X, em um difratômetro (*Bruker -radiação CuKα*). As análises térmicas por TG/DTG (*STD Q600 - TA Instruments*) foram realizadas utilizando o nitrogênio como gás de purga com vazão de 100 ml.min^{-1} com isoterma à 35ºC e taxa de aquecimento de 10ºC.min^{-}1 até 1000ºC [10].

Para avaliar a influência da moagem do resíduo, na hidratação das pastas, o teor de substituição foi mantido em 15% e a relação água/sólidos de 0,5. As pastas foram preparadas, utilizando as amostras do Ecat original e moído em diferentes tempos, e uma de referência, contendo apenas cimento e água, sendo então denominadas respectivamente por E0, E1, E3, E5 e E10 e Ref.

A análise das reações iniciais das pastas, foi realizada por calorimetria isotérmica durante as primeiras 72h de hidratação, em temperatura constante à 30ºC. Os ensaios foram realizados em um calorímetro isotérmico (*TAM Air -TA instruments).* A referência inerte utilizada foi uma areia quartzosa seca [11]. Para as análises térmicas, as pastas foram preparadas nas mesmas condições e idade da calorimetria, sendo mantidas em sacos de polietileno selados desde sua preparação até análise. Para quantificação das perdas de massa de cada fase por meio das curvas TG, utilizou-se o método proposto por Dweck *et al.* [10], com base à massa calcinada.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo dos parâmetros de moagem

Os parâmetros de moagem foram avaliados baseado nos seguintes princípios: *i)* otimização na redução do tamanho das partículas do resíduo; *ii)* baixo consumo de energia e *iii)* menor consumo de aditivos. A Figura 1 apresenta as curvas de distribuição granulométricas de cada parâmetro, as curvas destacadas em vermelho, foram as consideradas melhores condições. No estudo da frequência de rotação (Figura 1-a), verificou-se que, o aumento da velocidade de 200 para 300 rpm ocasionou um aumento significativo no rendimento da moagem. Por outro lado, quando elevado para 400 rpm, o aumento no rendimento não foi proporcional. A partir destes resultados, a frequência de rotação foi determinada em 300 rpm. Na (Figura 1-b) os resultados mostram que, utilizando as esferas de 5 mm obteve melhor rendimento. A Figura 1-c, mostra que o uso de diferentes teores de dispersante (propilenoglicol), não acarretou mudanças significativas, sendo desnecessária a sua utilização.



Figura 1- Curvas de distribuição granulométricas dos parâmetros avaliados no estudo de moagem

3.2 Caracterização dos materiais e influência da moagem

A Figura 2 apresenta as curvas de distribuição granulométrica do Cimento (CPP), e das amostras do resíduo nomeados de acordo com o tempo de moagem, respectivamente por Ecat-0, Ecat-1, Ecat-3, Ecat-5 e Ecat-10. É possível notar nitidamente a diferença do tamanho das partículas entre o resíduo não moído (Ecat-0) e o cimento (CPP), pelo afastamento, a esquerda, da curva de frequência acumulada. Observa-se que a moagem acima de 3 minutos, reduziu a granulometria, de maneira tal, que 100% das partículas do Ecat tornaram-se inferiores às do cimento. As curvas de frequência (Figura 2) mostram como as partículas estão distribuídas. Nota-se que o Ecat-0 apresenta uma curva mais estreita, com os diâmetros variando em menor intervalo, indicando maior uniformidade de tamanhos da amostra. Já para as amostras moídas a partir de 3 minutos, bem como a do cimento, observa-se o aumento do intervalo de variação dos diâmetros, o que favorece o melhor empacotamento das partículas [6].

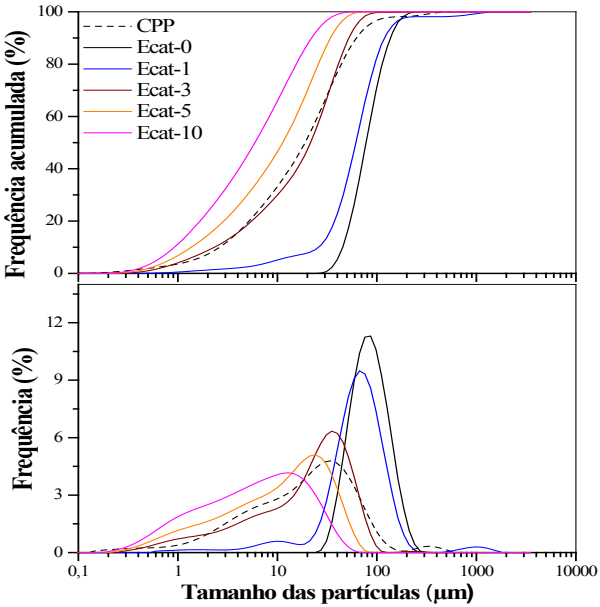


Figura 2- Curvas de distribuição granulométricas dos materiais

A Tabela 1 apresenta a composição química em óxidos do Cimento (CPP), residuo não moído (Ecat-0) e o resíduo moido por maior tempo (Ecat-10). Estes foram corrigidos com a perda ao fogo (P.F), obtida a partir das análises térmicas. O CPP apresentou estabilidade térmica com perda de apenas 1.47%, e constituído basicamente pelo óxidos do clínquer e da gipsita, composição que favorece o estudo da influência de sua substituição por Ecat sem que haja interferência de outros materiais agregados. As amostras Ecat-0 e Ecat-10 tem respectivamente 89.28% e 89.17% de sua composição formada por SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3, atendendo quimicamente as exigências para materiais pozolânicos [12]. Os resultados também evidenciam que a moagem não acarretou mudanças significativas na sua composição.

	CaO (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	SO_3 (%)	MgO (%)	La_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	NiO (%)	V_2O_5 (%)	K_2O (%)	Out (%)	*P.F (%)
CPP	60.38	20.59	3.83	4.66	3.29	-	3.48	-	-	1.18	1.12	1.47
Ecat-0	0.10	44.91	43.45	0.14	-	3.15	0.92	0.69	0.57	0.10	2.37	3.61
Ecat-10	0.10	43.74	44.52	0.12	-	3.12	0.91	0.65	0.57	0.09	2.23	3.96

*P.F = Perda ao Fogo – Obtida por TG

Tabela 1: Composição química do cimento, Ecat-0 e Ecat-10

Na Figura 3 é apresentada a composição minerológica do Cimento, Ecat-0,

Ecat-3 e Ecat-10. Os difratogramas das amostras do resíduo mostram que, o tempo de moagem não acarretou mudanças nas fases cristalinas do resíduo, fato observado pela sobreposição dos difratogramas, com os picos encontrados nos mesmos valores de 2θ. Para todas as amostras, as principais fases cristalinas identificadas foram o silicato de alumínio (SiA) e o óxido de alumínio (AlO). Observa-se também que o Ecat é um material razoavelmente amorfo, visto apresentar um baixo e largo halo nos respetivos difratogramas. No difratograma do CPP (Figura 3), foram identificadas as principais fases do cimento Portland: C_3A, C_2S, C_3S e C_4AF [13]. Dentre essas, verifica-se uma predominância nas fases C_3S e C_2S. Além dessas fases, foi identificada a presença da gipsita (G), adicionada ao cimento no momento da moagem.

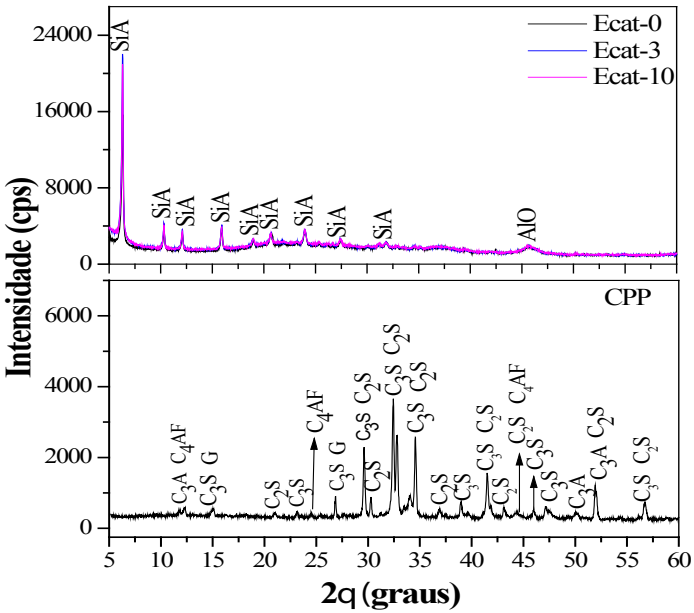


Figura 3: Difratogramas do cimento (CPP) e das amostras Ecat-0, Ecat-3 e Ecat-10

3.3 Influência do tamanho de partículas no calor de hidratação

A Figura 4 mostra a evolução das curvas de fluxo de calor das pastas, normalizadas pela massa de cimento, obtidas por calorimetria isotérmica, das pastas contendo Ecat com diferentes tempos de moagem e da pasta de referência.

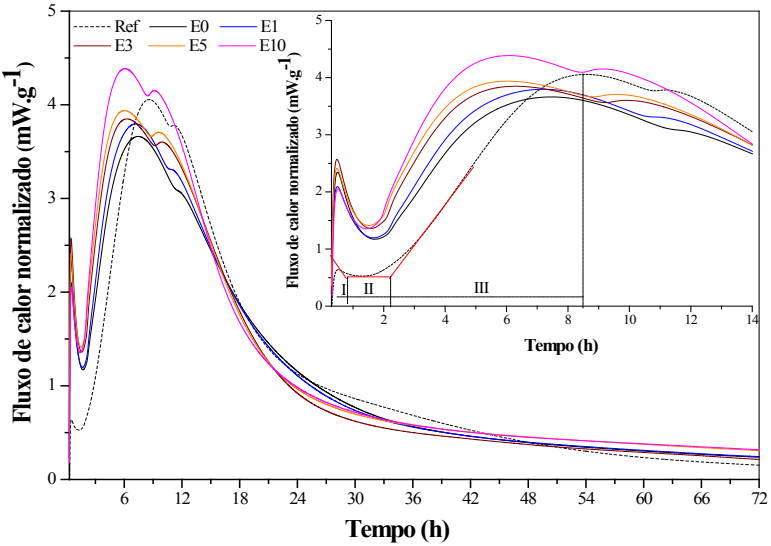


Figura 4 - Curvas da evolução do fluxo de calor das pastas

Para melhor visualização dos períodos iniciais do processo de hidratação de cada amostra, são mostradas também as primeiras 14 horas, exemplificando, na curva de referência, como o período de indução (II) foi determinado, e consequentemente, o tempo de pré-indução (I) e o tempo do período de aceleração (III). O primeiro evento térmico observado corresponde ao período de pré-indução (I) que tem como característica a dissolução e dissociação de espécies iônicas na fase líquida e formação de fases hidratadas como a etringita e uma pequena fração da tobermorita [14]. Nota-se que, as amostras contendo o resíduo tiveram esse período estendido quando comparado a amostra de referência, e maior liberação calor. Esse fato indica maior formação de etringita, que pode ter sido causado por uma ação nucleante do Ecat, que quanto mais fino gera mais núcleos de precipitação das fases que se formam [15].

Na sequência, ocorre o período de indução (II), onde a etringita formada na etapa anterior recobre as partículas de cimento não hidratadas diminuindo a taxa de hidratação e em consequência, o fluxo de calor resultante[14]. Nas pastas contendo Ecat, um menor teor de cimento, contribui para que se reduza esse período. Ao fim do período de indução, a concentração crítica de íons leva à retomada das reações de hidratação ocasionando um aumento na taxa de liberação de calor, ocorrendo o período de aceleração (III). Neste período, ocorre majoritariamente a hidratação do silicato tricálcico (C_3S) formando hidróxido de cálcio e tobermorita, que confere rigidez ao cimento hidratado [6,14].

Analisando Figura 4, percebe-se que a presença do Ecat, para todos os casos, reduz o período de aceleração quando comparado com a amostra de referência, e que quanto menores as partículas do resíduo, mais rápido é atingido o pico máximo da reação. Para a amostra E10 além de atingir o pico máximo cerca de 2.55 horas antes da

amostra de referência, também apresentou maior fluxo de calor. Esses fatos, em uma primeira análise, podem ser decorrentes do efeito nucleante das partículas do Ecat, que aumenta com o grau de moagem, como da reação pozolânica de Ecat com o hidróxido de cálcio formado [14].

3.4 Influência da moagem do Ecat na hidratação das pastas

A Figura 5 mostra as curvas TG e DTG na base da massa inicial de cimento. A pasta de referência apresentou uma massa calcinada em 1000ºC de 98.54%, sendo a mesma obtida no cimento anidro (CPP), pois a pasta hidratada composta apenas por cimento e água, ao final da análise térmica tem a mesma composição química da massa calcinada do cimento, quando ambos são analisados nas mesmas condições de operação [10]. A massa calcinada das pastas contendo Ecat foi de 115.9% da massa inicial de cimento (>98.54%) para todos casos, pois como o grau de substituição do cimento foi o mesmo, nessa massa calcinada estão, em base à massa inicial de cimento, mesma quantidade de óxidos correspondentes à fração de Ecat (17.36%) e os óxidos de cimento (98.54%). A conversão para a base de massa inicial de cimento permite uma comparação correta usando base de mesma composição, e evita erros de cálculo inerentes a variações nas proporções [10].

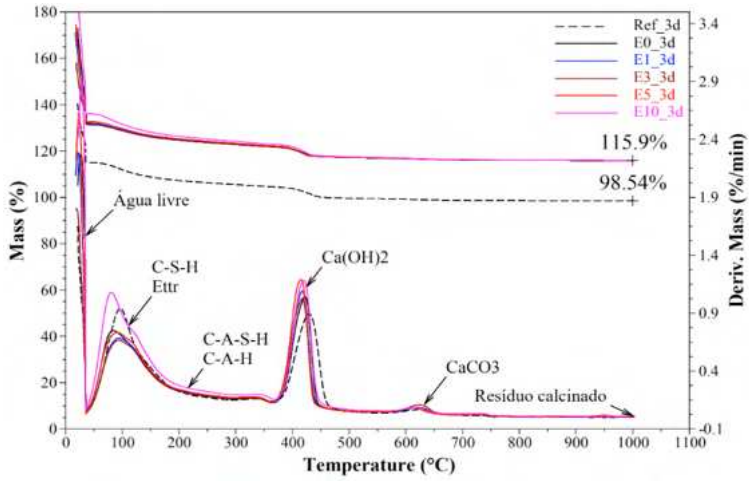
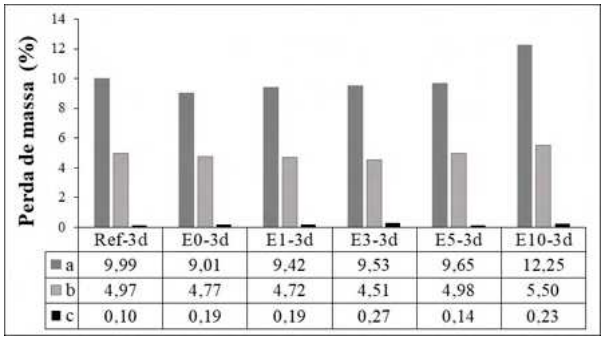


Figura 5 -Curvas de TG e DTG das pastas com 3 dias, em base a massa inicial de cimento

A partir das curvas DTG (Figura 5) é possível avaliar as reações de decomposição ocorridas durante a análise térmica, bem como as faixas de temperatura de sua ocorrência. A isoterma em 35°C, promoveu a evaporação da água livre, permitindo a quantificação separada da liberação da água combinada das fases hidratadas durante o aquecimento subsequente. Na faixa de temperatura entre 35 e 200°C observa-se o primeiro pico, associado à desidratação do CSH e etringita [10,16]. A continuidade da perda de massa até 350ºC está relacionada com a desidratação de aluminatos (CASH e CAH), entre 350°C e 500ºC ocorre a desidroxilação do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), e entre 500 e 700ºC, tem-se a decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) [14,17].

A quantificação das perdas de massa em base à massa inicial de cimento é mostrada na Figura 6. Analisando a perda de massa referente à desidratação das fases CSH, etringita, CASH e CAH ***(a)*** nas pastas contendo o resíduo, nota-se que houve ligeiro aumento gradativo de seu teor conforme a finura do Ecat, embora apenas a pasta E10-3d com 12.25% de perda, foi superior à de referência com 9.99%. A presença do Ecat-10, com diâmetro médio menor que a do cimento, acelerou o processo de hidratação, favorecendo o aumento destas fases hidratadas.

Os resultados apontam que, a substituição do cimento pelo resíduo, quando este apresenta granulometria maior ou igual do cimento, promove redução da água liberada pela desidroxilação do $Ca(OH)_2$ ***(b)***, visto que, a redução ocorreu até a pasta E3-3d. Nestas condições, as partículas do Ecat tem efeito pozolânico, demonstrado pelo consumo de CH, quando se compara com a pasta de referência. Por outro lado, quando o resíduo apresenta granulometria inferior à do cimento, observa-se aumento nos teores da água combinada liberada, o que favorece a hipótese de maior ação nucleante do Ecat mais moído do que sua ação pozolânica nos três primeiros dias de hidratação. Estes resultados corroboram com os resultados por calorimetria isotérmica, em que as pastas contendo o resíduo mais fino tiveram maior aumento na liberação de calor, associado a um maior grau de hidratação do cimento. O baixo teor de $CaCO_3$ ***(c)*** mostra que a carbonatação das pastas foi insignificante.



	Ref-3d	E0-3d	E1-3d	E3-3d	E5-3d	E10-3d
a	9,99	9,01	9,42	9,53	9,65	12,25
b	4,97	4,77	4,72	4,51	4,98	5,50
c	0,10	0,19	0,19	0,27	0,14	0,23

Figura 6- Quantificação das perdas de massa das principais fases das pastas com 3 dias

4 | CONCLUSÕES

A moagem do Ecat em moinhos de bolas do tipo planetário, mostrou-se eficiente na redução do tamanho de suas partículas em curtos tempos de moagem, sem provocar alterações significativas em sua composição química e minerológica. As curvas de calorimetria isotérmica mostraram que, a presença do Ecat, para todos os casos, acelera o processo de hidratação quando comparado com a amostra de referência, e quanto menores as partículas do resíduo, mais rapidamente é atingida a taxa máxima de reação, e maior é o calor gerado das reações que ocorrem nos primeiros 3 dias. Os resultados indicam que a moagem do Ecat melhora sua reatividade nas pastas cimentícias, favorecendo não só sua atividade pozolânica, como também sua ação nucleante acelerando a formação de produtos de hidratação.

REFERÊNCIAS

1. Ferella F, Innocenzi V, Maggiore F. Oil refining spent catalysts: A review of possible recycling technologies. Resour Conserv Recycl. 2016;108:10–20.

2. Pinto CA, Büchler PM, Dweck J. Pozzolanic properties of a residual FCC catalyst during the early stages of cement hydration : Evaluation by thermal analysis. J Therm Anal Calorim. 2007;87:715–20.

3. Dweck J, Pinto CA, Büchler PM. Study of a Brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis. J Therm Anal Calorim. 2008;92:121–7.

4. Antonovič V, Sikarskas D, Malaiškienė J, Boris R, Stonys R. Effect of pozzolanic waste materials on hydration peculiarities of Portland cement and granulated expanded glass-based plaster. J Therm Anal Calorim. 2019;138:4127–37.

5. Velázquez S, Monzó J, Borrachero M V., Soriano L, Payá J. Evaluation of the pozzolanic activity of spent FCC catalyst/fly ash mixtures in Portland cement pastes. Thermochim Acta. Elsevier B.V.; 2016;632:29–36.

6. Cunha ALC da, Lemos MS, Meth S, Gonçalves JP, Dweck J. A study of the particle size effect on the pozzolanic activity of an equilibrium catalyst. J Therm Anal Calorim. 2011;106:805–9.

7. Zhao J, Li D, Liao S, Wang D, Wang H, Yan P. Influence of mechanical grinding on pozzolanic characteristics of circulating fluidized bed fly ash (CFA) and resulting consequences on hydration and hardening properties of blended cement. J Therm Anal Calorim. 2018;132:1459–70.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9831: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos. Rio de Janeiro; 2008.

9. Retsch GmbH, editor. Manual Planetary Ball Mill PM100 / / PM200. Germany; 2017.

10. Dweck J, Cunha ALC da, Pinto CA, Gonçalves JP, Büchler PM. Thermogravimetry on calcined mass basis - Hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis. J Therm Anal Calorim. 2009;97:85–9.

11. Wadsö L. Choosing a proper reference sample for a heat conduction calorimeter. Build Mater Lund Univ. Sweden; 2002;1–2.

12. ABNT. NBR 12653: Materiais Pozolânicos- Requisitos. Rio de Janeiro; 2015.

13. TAYLOR HFW. Cement Chemistry. London 2nd ed., editor. Thomas Telford TETTENHORST, R.; HOFMANN, A. Crystal chemistry of boehmite. Clays and Clays Minerals; 1997.

14. Lemos MS, Cunha ALC da, Dweck J. A study of cement Type II hydration partially substituted by Brazilian spent cracking catalyst fines: Part I. Non-conventional differential thermal analysis. J Therm Anal Calorim. 2017;130:573–84.

15. Payá J, Monzó J, Borrachero M V., Velázquez S, Bonilla M. Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R-lime pastes. Cem Concr Res. 2003;33:1085–91.

16. Dweck J, Melchert MBM, Viana MM, Cartledge FK, Büchler PM. Importance of quantitative thermogravimetry on initial cement mass basis to evaluate the hydration of cement pastes and mortars. J Therm Anal Calorim. 2013;113:1481–90.

17. Silva FGS, Junior RAF, Da Silva JS, Pinto KW, Andrade HMC, Dweck J, et al. Hydration of the equilibrium catalyst (Ecat) calcium hydroxide system: Thermogravimetric study of the formation of main hydrated phases. J Therm Anal Calorim. 2015;120:1089–98.



MÉTODO DE RIETVELD PARA QUANTIFICAÇÃO DE FASES EM RESÍDUOS PARA USO COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108116

MATOS; SAMILE RAIZA CARVALHO[1]; COSTA; ANA RITA DAMASCENO[1]; OLIVEIRA; JOSINORMA SILVA DE[1]; MACIEL; KUELSON RÂNDELLO DANTAS[1]; GONÇALVES; JARDEL PEREIRA[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: SAMILERCM@UFBA.BR

RESUMO: Esse artigo descreve uma metodologia para análise quantitativa da composição mineralógica de resíduos para aplicação como MCS, utilizando o método de Rietveld no software livre GSAS II. Os resíduos de mármore, porcelanato, bloco cerâmico, resíduo de cascalho e fosfogesso *são utilizados para aplicar* o método. O método de Rietveld permite a verificação e análise das fases mineralógicas dos resíduos visando a substituição de fontes naturais na produção de materiais cimentícios. A técnica permite avaliar a reatividade com base no percentual de fases não cristalinas e fornece parâmetros para aplicação de dosagens químicas por estequiometria, considerando a contribuição das fases efetivamente reativas.

PALAVRAS-CHAVES: Difração de raios X (DRX), Análise quantitativa, Rietveld, Cimentos, Resíduos, Materiais cimentícios suplementares.

ABSTRACT: This paper describes a methodology for mineralogical composition quantitative analysis of waste materials for application as SCM, by the Rietveld method using the free software GSAS II. The quantitative analysis combined with XRF is used to determine the composition of marble, clay tile, clay brick, phosphogypsum, and gravel wastes. The Rietveld method allows the verification and analysis of waste mineral compounds aiming at the replacement of the natural source in the production of cementitious materials. The technique allows evaluating the reactivity based on the non-crystalline phase content and provides parameters for the application of chemical proportioning by stoichiometry, considering the contribution of the effectively reactive phase.

KEYWORDS: X-ray diffraction (XRD), Quantitative analysis, Rietveld, Cement, Wastes, Supplementary cementitious materials.

1 | INTRODUÇÃO

A substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma alternativa promissora para a redução da emissão de CO_2 e da extração de matérias-primas naturais pela indústria cimenteira[1,2]. Essa estratégia já é utilizada e os principais materiais empregados são fíler calcário, cinza volante e escórias[3]. No entanto, a limitação desses materiais em algumas regiões tem motivado a busca por resíduos locais que possam ser utilizados como MCSs.

Para avaliar o potencial de aplicação de um resíduo como MCS é importante realizar uma caracterização completa, com ensaios físicos, químicos e mineralógicos.

A caracterização mineralógica é complementar à análise química e é fundamental para compreender como os elementos estão conectados, em quais fases eles estão presentes e assim, entender sobre a reatividade do material[4].

A análise mineralógica pode ser feita qualitativamente, a fim de identificar as fases cristalinas presentes na amostra e quantitativamente para saber o teor de cada fase. O método de Rietveld é aplicado para quantificar as fases cristalinas. No entanto, para amostras com índice de cristalinidade abaixo de 100%, os percentuais das fases são superestimados e devem ser corrigidos. Três métodos alternativos podem ser utilizados para quantificar o teor de fases amorfas ou cristalinas identificadas no material, são eles o método do padrão interno[5], método do padrão externo[6] e o método das áreas[7].

Esse trabalho tem como objetivo fornecer as informações básicas para avaliação do potencial de uso de um material residual a partir da análise da composição de fases. Para tanto, será apresentado o procedimento necessário desde o preparo da amostra até a análise de Rietveld no *software* livre GSAS II e a determinação do índice de cristalinidade. Por fim, será apresentada a possível aplicação desses resultados na dosagem química estequiométrica.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais residuais analisados nesse estudo foram fosfogesso (FG) e resíduos de cascalho (CAP), bloco cerâmico (RBC), porcelanato (RP) e mármore (RM). O FG foi um resíduo da produção de ácido fosfórico em uma indústria de fertilizantes. O CAP foi resíduo da perfuração de um poço para extração de petróleo e gás. O RCB foi material residual de uma fábrica de blocos cerâmicos vermelhos, o RP foi de uma distribuidora de placas de porcelanato esmaltado. O RM foi material descartado obtido em empresa de fabricação de peças ornamentais. As características físicas dos materiais são apresentadas na Tabela 1.

Propriedade	FG	CAP	RBC	RP	RM
Massa específica (kg m^{-3})	2438	2710	2814	2601	2781
D_{10} (µm)	1,37	1,60	0,77	0,83	0,73
D_{50} (µm)	7,98	8,55	3,14	3,14	3,69
D_{90} (µm)	32,05	81,97	10,20	8,61	15,33

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais residuais.

A Tabela 2 apresenta a composição química das matérias-primas obtidas por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) usando um instrumento S8 Tiger (Bruker).

Material	CaO	SiO_2	MgO	SO_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	Outros	PF
FG	33,02	1,10	0,02	40,43	0,11	0,48	49 ppm	0,68	0,73	n.d.	1,09	22,34
CAP	2,21	52,71	3,30	0,16	18,59	7,66	2,85	0,92	0,16	1,23	0,30	9,91
RBC	0,09	64,79	1,29	0,04	20,86	6,55	3,43	0,94	0,11	0,11	0,67	1,12
RP	1,29	65,02	0,98	0,03	20,23	4,60	2,16	0,51	0,06	3,06	1,99	0,07
RM	49,03	4,53	3,71	0,04	0,45	0,27	0,07	0,03	0,01	n.d.	0,11	41,75

Tabela 2 – Composição de óxidos dos materiais residuais (%).

2.2 Difração de raios X (DRX)

As análises são realizadas em um difratômetro de raios-x (*Bruker - radiação CuKα*), com passo de 0,02°/s, coletados numa faixa de 5 a 70° (2θ). Para interpretação de cada difratograma no *software Highscore Plus 3.0.5* é necessário inicialmente converter o arquivo, do formato.txt (gerado pelo equipamento de DRX) para o formato.rd. Esse procedimento é realizado no *software ConvX,* colocando no parâmetro do equipamento *(Anode - Cu).* A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas, desde a difração de raio-x até a quantificação das fases.

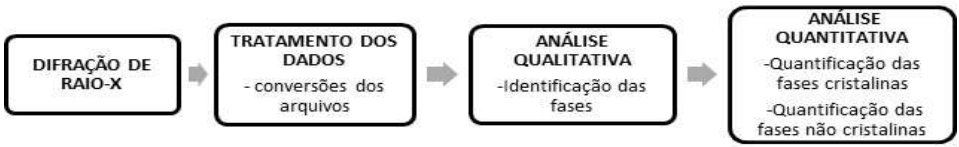


Figura 1. Fluxograma das etapas para análise dos dados

2.2.1 Análise qualitativa

Para análise qualitativa das fases cristalinas no *software Highscore Plus 3.0.5,* são utilizadas as fichas cristalográficas do bancos de dados *Inorganic Crystal Structure Database* (ISCD) e *Crystallography Open Database* (COD). A escolha das fichas pode ser facilitada com o apoio da composição de óxidos da amostra obtida por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Com essa análise podem ser descartados elementos que não estão presentes na amostra e priorizados elementos presentes em maior quantidade.

A busca nas referências bibliográficas nas quais materiais semelhantes foram analisados também é uma ferramenta para nortear a escolha das fichas para o refinamento. As fichas com bom ajuste, coincidem com os picos da amostra. Além disso, é importante observar que os três picos principais (de maiores intensidades) das fichas selecionadas estejam presentes na amostra.

2.2.2 Análise quantitativa pelo método de Rietveld

O método Rietveld consiste basicamente em ajustar uma curva teórica ao difratograma experimental, por meio do método dos mínimos quadrados. A curva teórica contém parâmetros estruturais, tais como dimensões de célula unitária e posições atômicas, de modo que o procedimento de ajuste resulta no refinamento dos parâmetros inicialmente utilizados.

Parâmetros de refinamento

No software *GSAS II* os parâmetros gerais refinados são o fator de escala, a curva de Background (*polinômio de Chebyschev*), o deslocamento da amostra (erro de altura), os parâmetros das células unitárias e, por fim, os parâmetros instrumentais da forma de pico (W, X, V, U, SH/L), onde o W refina a largura da gaussiana relacionada ao alargamento instrumental. Esse parâmetro deve apresentar valor positivo. O X refina a largura da lorentziana relacionada ao tamanho do cristalito. O V refina a largura gaussiana relacionada ao alargamento instrumental. O U refina a largura da gaussiana relacionada à microdeformação da rede, representando também uma contribuição instrumental. O SH/L refina os termos de assimetria relacionados à divergência axial.

O resultado do refinamento corresponde à fração mássica de cada fase cristalina identificada. A qualidade do ajuste é avaliada pelo fator chi-quadrado (X^2), que corresponde ao *Goodness of Fit* (GOF) ao quadrado. No GSAS II, X^2 corresponde à soma dos desvios quadrados entre os valores observados e calculados para cada ponto de dados. Geralmente, o resultado é considerado confiável se o valor de X^2 se encontra na faixa de 1,0 a 2,0[8].

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas de refinamento utilizando o software *GSAS II*. Com as fichas das fases identificadas no formato (*.cif)*, do difratograma da amostra em estudo no formato (*.raw)* e do arquivo de parâmetros do equipamento em (*.prm)*, é possível iniciar o refinamento pelo método de Rietveld. Alguns passos devem ser seguidos: 1) Abra um novo projeto e salve-o com um novo nome (File->New Project; File->Save Project). 2) Selecione Import->Phase->from CIF file e, em seguida, uma por uma, selecione cada fase que você deseja refinar. 3) Selecione Import->Powder Data-> from GSAS powder data file e escolha o arquivo dos dados de difração. Certifique-se de que seus dados do DRX foram salvos em um formato (.raw). O GSAS II solicitará automaticamente que você insira um arquivo de parâmetros do instrumento (.prm) e esse mesmo arquivo poderá ser usado para todas as amostras referentes ao mesmo equipamento. Em seguida uma janela surgirá automaticamente, perguntando a quais fases a amostra será associada. Clique em *Set All* ->OK para associar a todas as fases inseridas anteriormente. 5) Selecione PWDR->Sample Parameters e desative a caixa do Histogram scale factor (fator de escala do histograma), caso tenha mais de uma fase. 6) Clique em uma das fases na árvore de dados e você notará que uma das outras janelas agora aparece com muitas informações e abas sobre a fase selecionada. Selecione a aba *Data* e clique na caixa de refinamento *Phase fraction* (fração de fase). Isso permite refinar a intensidade dessa fase específica. Caso tenha mais de uma fase, terá que fazer para todas as fases. 7) Selecione *Calculate->Refine*. O refinamento será executado e, quando concluído, exibirá o valor de Rw (residual ponderado). O programa solicitará o carregamento dos novos resultados, selecione OK. 8) Vá a PWDR->*Background* e uma nova janela será aberta. Se a forma geral da linha de base estiver errada, você poderá adicionar mais termos ao polinômio de Chebyschev *"Number of coeff."* Selecione

Calculate -> Refine. Em geral, quanto mais linear fora a linha de Background, menor será o número de termos necessários no polinômio. Nesta etapa o número de termos pode ser incrementado gradativamente até atingir o melhor ajuste, indicado por um menor Rw, após as iterações. 9) Para refinar o erro inerente à altura da amostra, vá para PWDR->*Sample Parameters* e clique na caixa de *Sample displacement* (refinamento de deslocamento de amostra). Selecione *Calculate -> Refine*. 10) Em seguida, a localização dos picos pode ser corrigida através do ajuste dos parâmetros da célula unitária. Seleciona-se uma fase e então a caixa *Refine unit cell* na aba *General*. Caso tenha mais de uma fase terá que fazer para todas as fases. Selecione *Calculate->Refine*. 11) Para ajustar a forma dos picos, vá para PWDR->*Instrument Parameters* e clique na caixa ao lado do parâmetro W. Selecione *Calculate->Refine*. Repita o processo ativando o parâmetro X e depois o V, U, SH/L. Todos eles são coeficientes matemáticos, para a forma do pico do padrão calculado. Em um bom refinamento, após esta etapa, o Rw indicado será menor que 10% e o GOF menor que 2, indicando um bom ajuste entre os padrões.

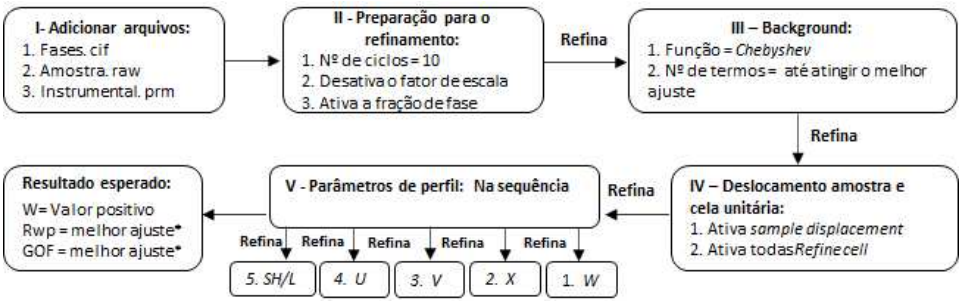


Figura 2 - Fluxograma das etapas do refinamento

2.2.3 Determinação do grau de cristalinidade

A quantificação obtida pelo método de Rietveld pode ser aprimorada com a determinação do grau de cristalinidade da amostra a partir da quantificação das fases não cristalinas e semicristalinas não identificadas (ACn). O método mais acessível para essa quantificação é descrito detalhadamente em Mittemeijer e Scardi[7]. Consiste em estimar o grau de cristalinidade aplicando o cálculo das áreas referentes às fases cristalinas (picos agudos do difratograma experimental) e fases não cristalinas em um intervalo de difração 2Θ[9]. Nesse método, o teor de ACn é determinado aplicando a Equação 1[7]. A variável AA, corresponde à porção não cristalina da amostra. Seu valor é obtido a partir da linha de base extraída do GSAS II após o refinamento, a essa curva é aplicada uma função P*seudo-voigt* centrada no ângulo (2Θ) em que há o halo amorfo. A área sob a função Pseudo-Voigt representa o teor de fases não cristalinas. Já a AC, área cristalina, corresponde a diferença entre a área sob o difratograma experimental e AA. O grau de cristalinidade é dado pela razão entre a área cristalina e a área total sob o difratogramas experimental, enquanto a porcentagem complementar corresponde ao ACn.

2.3 Avaliação da reatividade dos materiais e dosagem química por estequiometria

A análise quantitativa pelo método de Rietveld combinada à determinação do teor de fases não cristalinas é uma ferramenta prática para avaliação da reatividade de materiais cimentícios suplementares. Isso ocorre porque muitos materiais tornam-se mais reativos diante de uma desordem estrutural das suas fases. Esse efeito ocorre, por exemplo, em argilominerais. Os quais possuem pouca reatividade pozolânica quando em seu estado natural e tornam-se gradativamente mais reativos à medida que se aproximam da sua temperatura de desidroxilação[10]. No entanto, deve-se considerar que ao exceder continuamente a temperatura até a faixa de recristalização, a reatividade é reduzida em função da retomada da ordem na estrutura cristalina[11]. Portanto, MCS com elevado teor de fases amorfas apresentam maior potencial de reatividade.

O DRX/Rietveld quando combinado ao FRX permite estimar a composição de óxidos da fração não cristalina do material. Desse modo, a técnica viabiliza a aplicação da dosagem química, ou seja, que consideram as reações com base em suas relações estequiométricas. Através da diferença entre o teor de determinado óxido obtido por análise de FRX e o seu teor nas fases cristalinas quantificadas após análise de DRX, é possível calcular o seu percentual potencialmente reativa nos MCS. Isto é, o percentual do óxido presente na fase amorfa que apresenta maior potencial de reação para formação de produtos hidratados.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise quantitativa pelo método de Rietveld de materiais residuais

A composição mineralógica dos resíduos é apresentada na Figura 3. A Figura 3a apresenta os difratogramas com a identificação das fases cristalinas e a Figura 3b a quantificação obtida pelo método de Rietveld e das áreas.

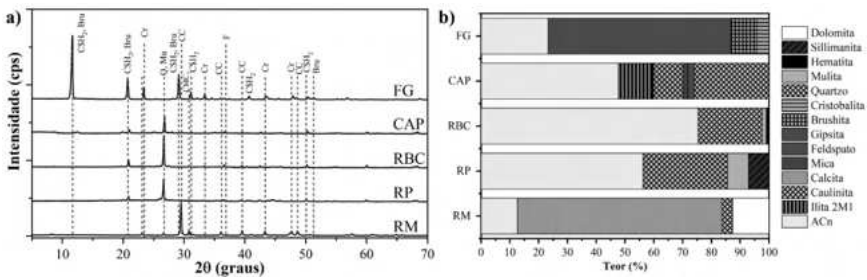


Figura 3 – Composição mineralógica dos resíduos obtida por DRX (a) e quantificada por Rietveld (b).

O PG é essencialmente composto por gipsita, brushita e cristobalita (ICSD 27221, 109193, 180900). O CAP contém quartzo, ilita, caulinita, mica e feldspato (ICSD 34644, 90144, 63192, 172270, 4354). As fases cristalinas do RBC e RP consistem em quartzo,

mulita, sillimanita e hematita (62404, 158097, 100450, 33643). O RM é composto por calcita, dolomita e quartzo (80869, 10404, 62404).

3.2 Potencial de aplicação dos resíduos como MCSs

Por conta do alto teor de gipsita observado no PG, ele tem potencial para ser utilizado como controlador de pega na produção do cimento, substituindo a matéria prima natural. Alguns estudos já avaliam esta aplicação[12,13]. A desidroxilação durante a queima da cerâmica promove uma desordem de fase estrutural resultando em fases amorfas e mais reativas[14]. Nesse caso, o RBC se destaca pelo maior teor de fases não cristalinas (75%) e consequente com maior reatividade. Este fator, junto ao alto teor de fases compostas por aluminossilicatos justifica os estudos do RCB como potencial MCS. A mesma análise também justifica os estudos do RM como MCS[15]. O RM é composto por cerca de 56% de carbonatos, esta composição justifica os estudos que já realizados para avaliar o seu potencial como fíler calcário[16]. Por fim, o alto teor de aluminossilicatos no CAP e a grande quantidade de fases não cristalinas (47,66%) indicar um potencial pozolânico do material, mas ainda são necessários estudos para avaliar o seu uso como MCS. Na indústria cimenteira, o CAP já foi avaliado como matéria prima na produção de clínquer Portland[17].

3.3 Aplicação da quantificação na dosagem química por estequiometria

Os resíduos baseados em argilas submetidas à queima (RBC e RP) podem ter a razão Al_2O_3/SiO_2 dos argilominerais e o percentual de alumina reativa calculados pela associação entre os resultados de DRX/Rietveld e FRX. Através da diferença entre o teor de SiO_2 total obtido por análise de FRX e o teor de quartzo quantificado após análise de DRX, é possível calcular o percentual de dióxido de silício no argilomineral. Para o RBC, por exemplo, 64,79% de SiO_2 foi identificado por FRX e 22,35% de quartzo foi quantificado por DRX/Rietveld. Ou seja, o teor de SiO_2 no argilomineral desse resíduo de argila é de 42,44%. Uma vez que o teor de Al_2O_3 é de 20,86%, é identificada uma relação Al_2O_3/SiO_2 de aproximadamente 2,0, a qual está relacionada à presença de montmorilonita. Para o RP, essa proporção é de 1,8, indicando a presença de argilominerais nas proporções de 1:1 (caulinita) e 2:1 (montmorilonita).

Aplicando a diferença entre o teor de Al_2O_3 total (FRX) e o percentual desse óxido nas fases cristalinas dos resíduos (mulita e sillimanita), identifica-se os teores de alumina da fração não cristalina. Isto é, o RBC e RP possuem 4,40% e 3,02% de alumina reativa, respectivamente. O conhecimento desse percentual permite ser mais realista em relação ao potencial de reatividade das matérias-primas, aprimorando a aplicação da dosagem estequiométrica de cimentos contendo MCS e até mesmo de materiais álcali ativados[18,19].

4 | CONCLUSÕES

Com base nos resultados, as seguintes conclusões podem ser definidas:

- O uso de softwares livres para a análise quantitativa pelo método de Rietveld é uma técnica de baixo custo e que permite aprofundar as interpretações dos resultados qualitativos do DRX.

- A análise de Rietveld e quantificação de fases não cristalinas é fundamental para avaliação do potencial de uso de um material residual como MCS.
- As análises de DRX/Rietveld combinadas ao FRX permite estimar o tipo de argilomineral constituinte de resíduos argilosos, bem como calcular a fração efetivamente reativa dos seus óxidos. Isso viabiliza uma abordagem mais realista do potencial das reações decorrentes do uso de resíduos como MCS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB, Bolsas nº 0397/2018, 0287/2019 e 0289/2020) pelo apoio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa. Esse trabalho também foi patrocinado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Bolsas nº 451677/2019-1 e 88887.124147/2014-00) em uma parceria entre a UFBA, UFRGS e UNICAMP pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD).

REFERÊNCIAS

1. ISTERI, V. *et al.* Production and properties of ferrite-rich CSAB cement from metallurgical industry residues. **Science of the Total Environment,** vol. 712, p. 136208, 10 Apr. 2020.

2. SCRIVENER, K. *et al.* Calcined clay limestone cements (LC^3). **Cement and Concrete Research,** vol. 114, no. August 2017, p. 49–56, 2018.

3. GCCA - Global Cement & Concrete Association. **Cement Sustainability Initiative, Getting the numbers right.** Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/. Acesso em 10 de jun. 2021.

4. ANDERSON, J. *et al.* X-ray diffraction - New eyes on the process. In: 2014 IEEE-IAS/PCA **Cement Industry Technical Conference**. IEEE, p. 1-9.2014.

5. DE LA TORRE, A. G. *et al.* Rietveld quantitative amorphous content analysis. **Journal of Applied Crystallography,** v. 34, n. 2, p. 196-202, 2001.

6. ARANDA, M. A. G. *et al.* Rietveld quantitative phase analysis of OPC clinkers, cements and hydration products. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry,** v. 74, n. 1, p. 169-209, 2012.

7. MITTEMEIJER, E. J.; SCARDI, P. **Diffraction analysis of the microstructure of materials.** 1st ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

8. ABU, M. J. *et al.* Synthesis of high purity titanium silicon carbide from elemental powders using arc melting method. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 47, p. 86-92, 2014.

9. CALLIGARIS, G. A. *et al.* On the quantitative phase analysis and amorphous content of triacylglycerols materials by X-ray Rietveld method. **Chemistry and Physics of Lipids,** v. 212, p. 51–60, 2018.

10. TEKLAY, A. *et al.* Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. **Cement and Concrete Research,** v. 61, p. 11-19, 2014.

11. TIRONI, A. *et al.* Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,** v. 117, n. 2, p. 547-556, 2014.

12. CÁNOVAS, C. R. *et al.* Valorization of wastes from the fertilizer industry: Current status and future trends. **Journal of Cleaner Production,** vol. 174, p. 678–690, 20 Jan. 2018.

13. ROSALES, J. *et al.* Treated phosphogypsum as an alternative set regulator and mineral addition in cement production. **Journal of Cleaner Production,** vol. 244, 2020.

14. SCRIVENER, Karen, et al. **Calcined clays for sustainable concrete**. RILEM, 2015.

15. KANNAN, D. M. *et al.* High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials,** v. 144, p. 35-41, 2017.

16. SINGH, M. *et al.* An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials,** v. 134, p. 471-488, 2017.

17. AL DHAMRI *et al.* Oil-based mud cutting as an additional raw material in clinker production. **Journal of hazardous materials**, v. 384, p. 121022, 2020.

18. FERREIRO, S. *et al.* Effect of raw clay type, fineness, water-to-cement ratio and fly ash addition on workability and strength performance of calcined clay-limestone Portland cements. **Cement and Concrete Research,** v. 101, p. 1-12, 2017.

19. COSTA, A. R. D. *et al.* Hydration of sustainable ternary cements containing phosphogypsum. **Sustainable Materials and Technologies,** p. e00280, 2021.



CAPÍTULO 7

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE MISTURAS SOLO-RESÍDUO VISANDO A UTILIZAÇÃO COMO BARREIRAS IMPERMEÁVEIS EM ATERROS SANITÁRIOS

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108117

BRESSAN JUNIOR; JOSÉ C.[1]; ZAMPIERI; LUCAS Q.[2]; NIENOV, FABIANO A.[3]; LUVIZÃO, GISLAINE[4]
[1,2,3,4] UNIVERSIDADE DO OESTE DE SANTA CATARINA
JOSE.CJ@UNOESC.EDU.BR

RESUMO: Desenvolveram-se misturas de solo com dois resíduos (lama de cal e gesso agrícola), objetivando emprega-las em camadas impermeáveis de aterros sanitários. As misturas foram formuladas variando-se o teor de adição e energia de compactação. São elas: 0RNOR, 10LC-NOR, 10GA-NOR, 0R-MOD, 10LC-MOD e 10GA-MOD (10LC: adição em 10% de lama de cal; 10GA: adição em 10% de gesso agrícola). Realizaram-se ensaios de permeabilidade de carga variável, visando determinar o coeficiente "k" e verificá-los aos padrões requeridos. Tanto a energia quanto a adição do resíduo foram capazes de reduzir as permeabilidades, entretanto, não foram suficientes para atingir valores inferiores a E-07 cm/s.

PALAVRAS-CHAVES: Solo-resíduo, permeabilidade, aterros sanitários, sustentabilidade.

ABSTRACT: Soil mixtures with two residues (lime sludge and agricultural gypsum) were developed, aiming to use them in impermeable layers of landfills. The mixtures were formulated by varying the addition content and compaction energy. They are: 0RNOR, 10LC-NOR, 10GA-NOR, 0R-MOD, 10LC-MOD and 10GA-MOD (10LC: 10% addition of lime slurry; 10GA: 10% addition of agricultural gypsum). Variable load permeability tests were carried out in order to determine the "k" coefficient and verify them to the required standards. Both the energy and the addition of the residue were able to reduce permeabilities, however, they were not enough to reach values lower than E-07 cm/s.

KEYWORDS: Soil-waste, permeability, landfills, sustainability.

1 | INTRODUÇÃO

Em um sistema de proteção em aterro sanitário, a camada de argila natural compactada é um dos artifícios essenciais para a manutenção do sistema de proteção, uma vez que esse artifício evita a percolação do contaminante para o lençol freático. Contudo, em função da formação e da composição mineralógica dos solos, em alguns casos o material natural não é suficiente para sanar os parâmetros de permeabilidade, resistência e plasticidade os quais é solicitado. Para tal, é possível empregar ao solo técnicas de melhoramento ou estabilização, a fim de adequar seu uso a barreiras impermeáveis.

Os solos utilizados em camadas impermeáveis, de acordo com Boscov (2008)[9], são de baixa permeabilidade e devem ser compatíveis quimicamente com o poluente a ser tratado ao longo do tempo. Conforme citam a CETESB (1993 apud BOSCOV, 2008)[9],

Heineck (2002)[11], Macambira (2002)[12], Omafra (2003, apud BOSCOV, 2008)[9] e Boscov (2008)[9] o valor do coeficiente de permeabilidade requerido para liners deve ser menor ou igual a 10^{-7} cm/s.

Boscov (2008)[9] afirma que outros materiais podem ser empregados como revestimentos de fundo ou de cobertura. A tendência é procurar resíduos reciclados em substituição aos solos, visando assim, preservar os recursos naturais e reduzir a disposição de resíduos no meio ambiente.

A pesquisa visou incorporar a uma massa de solo natural de formação residual, dois resíduos provenientes de atividades industriais: a Lama de Cal (Carbonato de Cálcio) e o Gesso Agrícola (Sulfato de Cálcio). Por meio da formulação de misturas de solo-resíduo, objetivou-se empregar esses materiais geotécnicos a uma barreira impermeável, assim como obter melhor compreensão do comportamento do material quanto suas propriedades de permeabilidade.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa utilizou um solo de origem residual basáltica do município de Joaçaba-SC. O material recebeu os ensaios de caracterização conforme Tabela 1. A análise granulométrica, realizada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016)[2], observa-se na Figura 1.



Figura 1 - Curva granulométrica do solo.

Umidade Natural (%) - NBR 6457 (ABNT, 2016)[1]	57,25	Índice de plasticidade (%)	13
Massa específica real dos grãos (g/cm³) - DNER-ME 093 (1994)[10]	2,91	Classificação textural	Silte argiloso
Limite de Liquidez (%) - NBR 6459 (ABNT, 2016)[3]	48	Classificação pela Highway Research Board (H.R.B)	A7-5
Limite de Plasticidade (%) - NBR 7180 (ABNT, 2016)[4]	35	Classificação pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)	CL – Argila pouco plástica

Tabela 1 - Características do solo.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois resíduos provenientes

de processos industriais diferentes, os quais foram classificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004)[6] como Classe II A – não inertes. Esses materiais também receberam os procedimentos de caracterização indicados na Tabela 2. As curvas granulométricas, conforme NBR 7181 (ABNT, 2016)[2] estão representadas na Figura 2.

Resíduo	Principal Componente	Umidade natural (%) - NBR 6457 (ABNT, 2016)[1]	Massa específica (g/cm³) - NBR 16605 (ABNT, 2017)[5]
Lama de Cal (LC)	Carbonato de Cálcio	31,30	2,77
Gesso Agrícola (GA)	Sulfato de Cálcio	46,39	2,60

Tabela 2 - Resíduos utilizados na pesquisa.

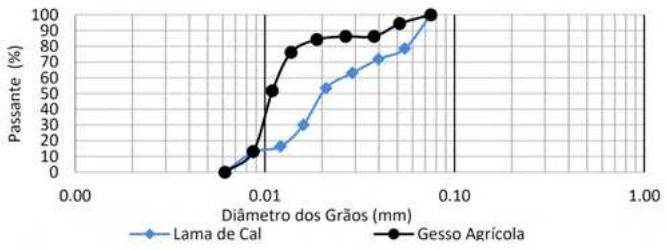


Figura 2. Curvas granulométricas dos resíduos.

Foram definidas seis misturas de solo-resíduo, onde a adição de resíduo ocorreu a partir da massa seca de solo. Para as misturas também se variou a energia de compactação em normal e modificada. A identificação e formulação das misturas podem ser observadas na Tabela 3. As misturas foram submetidas ao ensaio de compactação (Proctor normal e modificado, conforme a Tabela 3) de acordo com as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016)[7].

Mistura	Resíduo	Teor de resíduo	Energia de compactação
0R - NOR	-	0%	Normal
0R - MOD	-	0%	Modificada
10LC - NOR	LC*	10%	Normal
10LC - MOD	LC*	10%	Modificada
10GA - NOR	GA*	10%	Normal
10GA - MOD	GA*	10%	Modificada

*LC – Lama de Cal; *GA – Gesso Agrícola.

Tabela 3. Formulação das misturas solo-resíduo.

Os ensaios de permeabilidade de carga variável seguiram as prescrições da NBR 14545 (ABNT, 2000)[8], conforme as indicações do método B. Foram ensaiadas duas

amostras para cada mistura formulada. O cálculo do coeficiente de permeabilidade do solo ocorreu de acordo com o método proposto pela NBR 14545 (ABNT, 2000)[8], conforme a Equação (1).

$$k = \frac{\mathrm{aH}}{A\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

Onde: *a* é a área interna da bureta de vidro; *H* é a altura inicial do corpo de prova; *A* é a área inicial da amostra a ser ensaiada ; *Δt* é a diferença entre os intervalos de tempo t_1 e t_2; h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 e h_2 é a carga hidráulica no instante t_2. Os valores obtidos através da equação (1) foram ajustados através de um coeficiente *Rt*, o qual relaciona a viscosidade da água do ensaio com a viscosidade da água à temperatura de 20ºC, portanto, os valores utilizados neste trabalho referem-se ao coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20ºC (k20).

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 3 encontram-se as curvas de compactação das misturas e parâmetros para cada traço. Quando verificada a adição de resíduo aos traços, nota-se que tanto na energia normal quanto na energia modificada, que a adição de 10% de lama de cal (10LC) em relação à mistura sem resíduo (0R) provocou um aumento, embora pequeno, no γd max da mistura. Em termos de umidade ótima, analisou-se que não houve mudanças significativas, tanto na energia normal, quanto na modificada (Sd=0,35% para ambas).

No entanto, com a adição de 10% do resíduo gesso agrícola (10GA), notou-se que em ambas as energias de compactação houve redução no γd max da mistura em relação aos traços 0R e 10LC. Esse comportamento pode ser entendido em função do peso específico do resíduo (2,60 g/cm³), que é menor que o peso específico do solo (2,91 g/cm³) e da lama de cal (2,77 g/cm³). Ao que diz respeito a umidade ótima desse traço, avalia-se que o valor aumentou em relação às misturas 0R e 10LC, em ambas as energias. Este fato pode ser interpretado em relação à granulometria do gesso agrícola, que possuí partículas menores em relação à lama de cal, proporcionando assim uma maior superfície específica para a mistura.

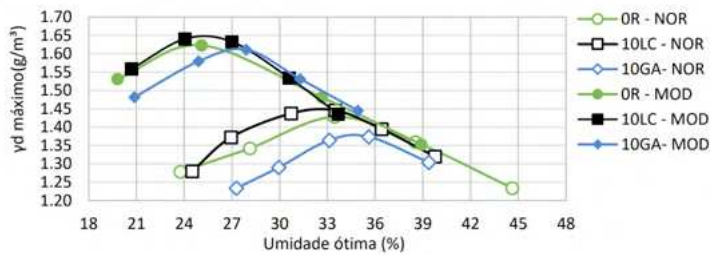


Figura 3. Curvas de compactação das misturas e parâmetros obtidos no ensaio de compactação.

Na Figura 4 podem ser verificados os resutados obtidos para cada ensaio realizado com as misturas de energia normal.

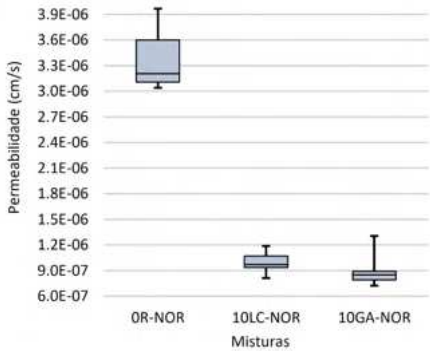


Figura 4. Análise dos dados do ensaio para as misturas compactadas à energia normal.

As misturas foram avaliadas pelo valor da mediana dos dados encontrados no ensaio. Optou-se por utilizar esse recurso em função da grande variação de valores para cada amostra, já que esta ferramenta fornece um valor mais representativo, uma vez que ela não é afetada pelos valores máximos e mínimos.

A mistura 0R-NOR, a qual foi compactada com energia normal e não possui adição de resíduo, apresentou ao longo do ensaio valores de k20 que variaram de 3,967E-06 a 3,040E-06 cm/s com coeficiente de permeabilidade (k20) de 3,222E-06 cm/s. Em relação a este dado, de acordo com Terzaghi, Peck e Mesri (1995)[13] o solo pode ser considerado com permeabilidade pobre ou baixa, característica de siltes orgânicos e inorgânicos, misturas de areia, silte e argila ou de argilas estratificadas.

Tratando-se das misturas com adição de resíduo, verifica-se que a mistura 10LC-NOR apresentou um coeficiente de permeabilidade de 9,915E-07 cm/s, apresentando durante o ensaio variações de 1,187E-06 a 8,118E-07 cm/s. Observa-se que a incorporação do resíduo, em relação à mistura sem adição e com a mesma energia de compactação (0R-NOR), proporcionou a redução do k20 em 69,23%.

Quanto a mistura com incorporação do resíduo gesso agrícola (GA), observa-se que o traço 10GA-NOR apresentou um coeficiente de permeabilidade (k20) de 8,503E-07 cm/s, com variações na faixa de 1,306E-06 a 7,225E-07 cm/s. Essa mistura, quando comparada a mistura sem resíduo e compactada com a mesma energia (0R-NOR), apresentou uma redução de 73,61% no valor do coeficiente de permeabilidade.

Notou-se que os menores valores de permeabilidade alcançadas estão marcados para a mistura 10GA-NOR, onde o resíduo utilizado é o gesso agrícola. A partir desse resultado, presume-se que o comportamento plástico do material teve maior influência na redução da permeabilidade, já que a porosidade e o peso específico aparente seco máximo (γd max) da amostra apresentaram valores maiores em relação as outras duas misturas.

Após essa interpretação de dados, é possível visualizar que comparando as

misturas compactadas com energia normal, inserção do resíduo foi benéfica, uma vez que teve a capacidade de reduzir o coeficiente de permeabilidade da mistura 0R-NOR (solo natural sem adição) de E-06 para a casa de E-07. Entretanto, nenhum dos coeficientes de permeabilidade alcançados para as misturas compactadas com energia normal atingiram valores menores que E-07, conforme solicitado por Boscov (2008)[9], CETESB (1993, apud BOSCOV, 2008)[9], Heineck (2002)[11], Macambira (2002)[12] e Omafra (2003, apud BOSCOV, 2008)[9].

Na Figura 5 pode ser verificado o intervalo de valores obtido para cada ensaio realizado com as misturas de energia modificada, assim como a mediana dos valores.

Ao analisar a mistura 0R-MOD, compactada com energia modificada e sem adição de resíduo, o coeficiente de permeabilidade (k20) passou para o valor de 2,779E-07 cm/s, apontando variações na faixa de 4,082E-07 a 2,406E-07 cm/s. Nota-se que alteração da energia normal para modificada proporcionou a redução da permeabilidade em 91,37%.

A mistura 10LC-MOD apresentou valor de coeficiente de permeabilidade (k20) de 1,116E-07 cm/s. Esse ensaio apresentou variações no valor de k20 que compreendem a faixa de 1,512E-07 a 8,911E-08 cm/s. A mistura quando comparada a 10LC-NOR, apresentou uma redução de 88,74% no valor da permeabilidade quando alterada a energia de normal para modificada.

No que diz respeito a mistura 10GA-MOD, seu coeficiente de permeabilidade ficou na faixa de 6,469E-07 cm/s, com variações que compreendem o intervalo de 7,040E-07 a 5,523E-07 cm/s. Nessa mistura, repara-se que a energia de compactação pouco fez efeito no que tange a redução da permeabilidade, uma vez que a troca de energia provocou uma redução de apenas 23,92% no valor.

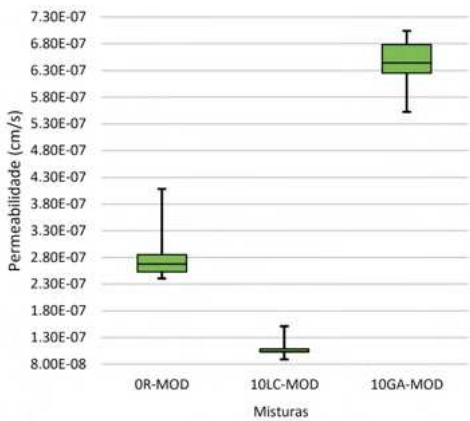


Figura 5. Análise dos dados do ensaio para as misturas compactadas à energia modificada.

Dentre as misturas compactadas com energia modificada, constatou-se que os menores valores de permeabilidade se verificam no traço 10LC-MOD, onde o resíduo utilizado é a lama de cal. Dessa forma, é perceptível que o bom desempenho dessa

mistura quanto a redução da permeabilidade justifica-se pela redução da porosidade do material, através do aumento do peso específico aparente seco máximo (γd max) da amostra compactada.

4 | CONCLUSÃO

Ao fim desse trabalho, verificou-se que embora as misturas não tenham atingido valores de coeficiente de permeabilidade iguais ou inferiores a 1,00E-07 cm/s, conforme requerido pela bibliografia, todos os traços obtiveram valores reduzidos em relação ao traço sem adição de resíduo e compactado com a energia normal (0R-NOR). Pode-se complementar que, a mistura 10 LC-MOD, apresentou valor de k20 na faixa de 1,116E-07 cm/s, demonstrando alguns valores dentro do mínimo requerido ao longo de todo o ensaio.

A energia de compactação quando alterada de normal para modificada, teve influência significativa quando analisada sua variação dentro de um mesmo teor, onde foram atingidos valores de redução de permeabilidade em até 91,37%. Nesse contexto, a adição do resíduo também proporcionou redução da permeabilidade do solo, uma vez que a adição em 10% de gesso agrícola ao solo, por exemplo, reduziu o valor em 73,61%.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

2. _____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

3. _____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

4. _____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

5. _____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

6. _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

7. _____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

8. _____. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

9. BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

10. DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER - ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real**. 1994, 4p

11. HEINECK, Karla S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

12. MACAMBIRA, Indira Q. **Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável**. 2002. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

13. TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3 ed. United States of America: Wiley International, 1995.



NEUTRALIZAÇÃO DO FOSFOGESSO COM CAL E A SUA INFLUÊNCIA NA HIDRATAÇÃO E NO DESEMPENHO MECÂNICO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108118

ANDRADE NETO; JOSÉ S.[1]; BERSCH; JÉSSICA D.[1]; SILVA, THAÍS S. M.[1]; RODRÍGUEZ, ERICH D.[2]; SUZUKI, SEIITI[3]; KIRCHHEIM; ANA PAULA[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS); [2]UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM); [3]INTERCEMENT.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: JOSEDASILVAANDRADENETO@GMAIL.COM

RESUMO: O fosfogesso possui potencial para ser utilizado como controlador de pega do cimento Portland, porém os P_2O_5 e F^- em sua composição retardam a hidratação e reduzem o desempenho mecânico da matriz nas primeiras idades. O objetivo deste estudo foi avaliar um processo simples de neutralização (retirada das impurezas) do fosfogesso a partir da mistura com cal hidratada. Foram confeccionados cimentos com gipsita, fosfogesso e fosfogesso neutralizado. Foram feitos ensaios de ICP-OES, calorimetria isotérmica e resistência à compressão. Observou-se que a neutralização com cal reduziu a concentração de impurezas, diminuindo o retardo na hidratação e elevando as resistências mecânicas iniciais.

PALAVRAS-CHAVES: Fosfogesso, Neutralização, Cimento Portland, Hidratação.

ABSTRACT: Phosphogypsum has the potential to be used as setting retarder for Portland cement, however P_2O_5 and F^- in its composition delay cement hydration and reduce the mechanical performance of the matrix in the early ages. The objective of this study was to evaluate a simple process of neutralization (removal of impurities) of phosphogypsum through the mixture with hydrated lime. Cements were made with gypsum, phosphogypsum, and neutralized phosphogypsum. ICP-OES, isothermal calorimetry, and compressive strength tests were performed. It was observed that neutralization with lime reduced the concentration of impurities, reducing the delay in hydration and increasing the initial mechanical strengths.

KEYWORDS: Phosphogypsum, Neutralization, Portland cement, Hydration.

1 | INTRODUÇÃO

O fosfogesso, resíduo da produção de ácido fosfórico, é um subproduto da indústria de fertilizantes. A produção de cada tonelada de ácido fosfórico resulta em 4 a 6 toneladas de fosfogesso (RASHAD, 2017). A geração mundial desse subproduto é de 280 milhões de toneladas por ano (CUADRI *et al.*, 2014), sendo gerados cerca de 5,6 milhões de toneladas no Brasil anualmente (HOLANDA *et al.*, 2017). Destes, 85% não é reutilizado, sendo usualmente depositados em grandes aterros. Os 15% restantes são reciclados sendo utilizados para tratamentos de estabilização de solo, como fertilizantes e para materiais de construção (TAYIBI et al., 2009). Este material é constituído principalmente de sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4.2H_2O$), possuindo,

assim, um grande potencial para ser utilizado como controlador de pega do cimento Portland, em substituição à gipsita (HOLANDA *et al.*, 2017). A utilização de fosfogesso na indústria de cimento resultaria em benefícios econômicos e ambientais (TAHER, 2007). Contudo, devido ao seu processo de fabricação, apresenta impurezas como fosfato (P_2O_5) e fluoreto (F^-) solúveis, assim como P_2O_5 na estrutura cristalina da gipsita. Com isso, têm-se reduções na resistência à compressão nas idades iniciais (HOLANDA *et al.*, 2017; RASHAD, 2017). Estes efeitos acabam por restringir a utilização de fosfogesso na indústria de cimento. Assim, a realização de processos de purificação/neutralização (retirada das impurezas) é necessária para favorecer a sua utilização no cimento Portland. A extração das impurezas do fosfogesso pode ser realizada por processos químicos, físicos ou térmicos ou uma combinação destes (SINGH, 2002).

Uma alternativa para neutralizar o fosfogesso é misturar o material com cal hidratada sólida (em pó). Esta opção, por não necessitar de água, calcinação ou materiais onerosos, é promissora em termos econômicos e de facilidade de ser implementada pela indústria. A mistura e moagem do fosfogesso com cal hidratada reduz os efeitos negativos das impurezas na hidratação do cimento Portland (POTGIETER e HOWELL-POTGIETER, 2001; POTGIETER *et al*., 2003) e do cimento supersulfatado (LIU *et al*., 2019). Contudo, ainda existem lacunas quanto ao uso e eficácia deste procedimento para reduzir o retardo ocasionado pelo fosfogesso e os seus efeitos nas propriedades da matriz de cimento Portland. Ainda não se conhece os efeitos do fosfogesso tratado com cal nas etapas de hidratação de cimento. Ademais, poucos estudos (POTGIETER e HOWELL-POTGIETER, 2001; POTGIETER *et al*., 2003) investigaram as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias com fosfogesso neutralizado com cal, sendo necessários mais estudos com outros fosfogessos para validar os resultados.

O presente trabalho, portanto, visa avaliar a neutralização do fosfogesso com a cal, representando uma alternativa mais simples e econômica para a indústria cimenteira, quando comparado aos processos de purificação relatados na literatura. Objetiva-se identificar a influência dessa neutralização na hidratação e no comportamento mecânico de matrizes cimentícias. Os resultados obtidos com o cimento com fosfogesso neutralizado como fonte de sulfato, foram comparados com os cimentos com gipsita e com fosfogesso sem neutralização.

2 | MATERIAIS

Neste estudo foram avaliadas três fontes de sulfato de cálcio: gipsita natural (Gip), fosfogesso (Fosf) e fosfogesso neutralizado (Neut). Para a neutralização do fosfogesso, 12 toneladas do material foram espalhadas em um piso industrial e então 600 kg de cal hidratada (5%, em relação à massa de fosfogesso) foram colocados sobre este material. Em seguida, os materiais foram misturados com o auxílio de uma pá carregadeira.

Em um processo industrial, as diferentes fontes de sulfato (7%) foram misturadas com clínquer (73%), escória de alto forno (15%) e fíler calcário (5%), formando, assim, três cimentos Portland compostos. A composição mineralógica dos cimentos foi determinada por difratometria de raios-X (DRX), em um difratômetro D8 Adavance da Bruker, com radiação Cu K, filtro de Ni. Foi utilizado um passo de 0,020° em um intervalo 2θ entre 5° e 70°, com uma velocidade de 0,72°/min. Como observado na Tabela 1, os cimentos apresentam composição mineralógica semelhante.

Fase	ICSD code	CP - Gip	CP - Fosf	CP - Neut
Alita	94742	45,57	45,90	46,53
Belita	79550	9,18	10,06	10,70
C_3A cúbico	1841	4,75	4,28	4,25
C_3A ortorrômbico	1880	2,22	1,89	1,86
C_4AF	9197	4,42	4,64	4,35
Cal livre	75785	0,31	0,23	0,24
Periclásio	104844	0,86	1,03	1,12
Gipsita	151692	5,39	5,79	5,80
Hemidrato	380286	2,18	2,65	2,64
Calcita	79673	7,34	7,25	7,49
Amorfo	-	17,76	16,44	16,02
Goodness of Fit (GOF)		1,78	2,06	2,05

Tabela 1 – Percentual de fases presentes nos cimentos, determinado por DRX/Rietveld.

A Tabela 2 apresenta as áreas superficiais dos cimentos, obtidas pelo método de Blaine, e o $D_{V,90}$, $D_{V,50}$ e $D_{V,10}$, determinados por granulometria a laser. É possível observar que os cimentos apresentam áreas superficiais e diâmetros de partículas similares.

Propriedade	CP - Gip	CP - Fosf	CP - Neut
Área superficial - Blaine [cm^2/g]	4790	4740	4580
D_{90} [µm]	31,19	33,19	34,28
D_{50} [µm]	11,46	11,90	15,76
D_{10} [µm]	1,80	1,87	2,89

Tabela 2 – Resultados da caracterização física dos cimentos.

3 | MÉTODOS

As quantidades de fósforo e flúor totais, impurezas responsáveis por retardar a hidratação do cimento, presentes na gipsita, no fosfogesso e no fosfogesso neutralizado, foram determinadas por fluorescência de raios-X (equipamento da Panalytical, modelo Axios). De forma complementar, foi realizada a técnica de ICP-OES para determinar as quantidades de fósforo total e solúvel. Para isso, foi utilizado o equipamento Icap 6000 da Thermo, com comprimento de onda de 213,618 nm, potência de 1300W e vazão do gás auxiliar e de nebulização (argônio) de 0,5 L/min. Para esta análise, foi adotada a metodologia proposta por Holanda et al. (2017), sendo o fósforo total determinado após a dissolução das amostras em ácido nítrico e o fósforo solúvel, após dissolução em água.

Em seguida, foi realizado o ensaio de calorimetria isotérmica. Para isso, foi

utilizado um microcalorímetro da marca TA Instruments, modelo TAM AIR, com oito canais. Neste ensaio, as pastas (≈ 7 g) foram acondicionadas em ampolas de vidro e o fluxo de calor foi monitorado durante as primeiras 72 horas. Foi utilizada uma temperatura de estabilização de 25 °C. Além disso, os tempos de início e fim de pega das pastas de cimento foram determinados pelo método da agulha de Vicat, de acordo com as diretrizes da NBR 16607 (ABNT, 2018). Por fim, foi avaliada a resistência à compressão com 14 horas, 1, 2, 7 e 28 dias de concretos confeccionados com os diferentes cimentos estudados. Na dosagem dos concretos, foi adotado um consumo de cimento igual 330 kg/m^3, de forma a se obter concretos de moderada resistência. Além disso, foi fixado um abatimento igual a 120 mm no ensaio de *slump-test*, sendo a quantidade de água definida a partir deste parâmetro. A Tabela 3 apresenta o consumo de materiais por metro cúbico de concreto. Os resultados de resistência à compressão foram avaliados por meio da análise ANOVA de fator único (α=0,05). Em seguida, assumindo que os dados de cada série têm distribuição normal, foi realizada uma análise de comparação de médias com o teste de Tukey.

Cimento	Areia Fina	Areia Artificial	Brita 19,0 mm	Água	Relação a/c
330	409	339	1082	193	0,59

Tabela 3 – Consumo de materiais, em quilograma por metro cúbico de concreto.

4 | RESULTADOS

4.1 Concentração de impurezas

A Tabela 4 apresenta as quantidades de flúor e fósforo totais, determinadas por FRX, e as quantidades de fósforo total e solúvel em água, determinados por ICP-OES. Como esperado, o fosfogesso apresentou quantidades de flúor e fósforo maiores do que a gipsita. A presença destas impurezas é a responsável pelo retardo na hidratação do cimento (HOLANDA *et al.*, 2017; RASHAD, 2017). Desta maneira, uma forma de avaliar a efetividade da neutralização é por meio da análise da quantidade de flúor e fósforo.

Em relação ao flúor, observa-se uma redução de 25,00% com o processo de neutralização com a cal. A mesma tendência foi observada para o fósforo total, em que a neutralização resultou na redução de 22,06% (determinado por FRX) e de 15,12% (determinado por ICP-OES). Já a quantidade de fósforo solúvel em água reduziu em 80,26% com a mistura do fosfogesso com a cal hidratada, indicando uma grande eficiência do processo neste quesito. Isso possivelmente ocorreu devido a reações entre o hidróxido de cálcio, presente na cal hidratada, e os fosfatos solúveis, resultando em fosfatos de cálcio, insolúveis em água, que não provocam retardo significativo na hidratação do cimento (SHEN *et al*., 2012; HOLANDA *et al*, 2017). Assim, nota-se que o processo foi efetivo em reduzir a quantidade de fósforo solúvel em água, porém não apresentou a mesma eficiência para reduzir a quantidade de fósforo e flúor totais, que também são responsáveis por retardar a hidratação do cimento.

Impureza	Gipsita	Fosfogesso	Fosfogesso neutralizado
Flúor total (%F^-) - FRX	0,00	0,16	0,12
Fósforo total (%P_2O_5) - FRX	0,10	1,36	1,06
Fósforo total (%P_2O_5) – ICP-OES	0,07	1,72	1,46
Fósforo solúvel (%P_2O_5) – ICP-OES	0,00	0,01	0,00
Fósforo solúvel (ppm) – ICP-OES	6.0	39.0	7.7

Tabela 4 – Concentração de fósforo e flúor dos diferentes materiais.

4.2 Hidratação

A Figura 1(A) apresenta as curvas de taxa de liberação de calor e de calor total liberado pelas pastas durante as primeiras 48 horas de hidratação. Observa-se que o cimento com gipsita apresentou uma maior taxa de hidratação em comparação aos cimentos com fosfogesso. Essas diferenças provavelmente se devem à presença de impurezas F^- e P_2O_5, solúveis ou presentes na estrutura cristalina do $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (HOLANDA *et al*., 2017). Durante a hidratação do cimento com fosfogesso, os íons fosfatos e flúor solúveis reagem com os íons cálcio, precipitando $Ca_3(PO_4)_2$ e CaF_2 na superfície dos grãos de cimento. Isso resulta na formação de uma camada que, segundo alguns autores (SINGH, 2002; SHEN *et al*., 2012; HOLANDA *et al*., 2017), reduz o fluxo de água e de íons, atrasando a dissolução e hidratação do cimento. Porém, a impermeabilidade dessa camada ainda não foi comprovada. O retardo na hidratação pode ser, também, pelo próprio processo de formação dos fosfatos e fluoretos de cálcio, que consomem íons cálcio da solução, atrasando a saturação destes que é necessária para o fim do período de indução e início da precipitação de $Ca(OH)_2$ (SCRIVENER *et al*., 2015). Ademais, segundo Bénard *et al*. (2008), o retardo se deve à adsorção dos íons fosfatos e flúor nos pontos preferenciais de dissolução na superfície dos grãos de cimento, atrasando a sua dissolução.

Nota-se que o fosfogesso neutralizado apresentou um comportamento intermediário, o que era esperado, pois o processo de neutralização reduziu em 80,26% a quantidade de fósforo solúvel e em 22,06% e 25,00% as quantidades de fósforo e flúor totais, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 3. Além disso, a dissolução da cal no fosfogesso neutralizado libera uma maior quantidade de íons cálcio para a solução, acelerando a saturação de íons cálcio – que é atrasada nas misturas com fosfogesso pela formação de $Ca_3(PO_4)_2$ e CaF_2. Com isso, o retardo provocado pelas impurezas foi reduzido, o que resulta em uma maior taxa de hidratação quando comparado com o fosfogesso sem neutralização. A Figura 1(B) apresenta os tempos de início e fim de pega dos cimentos, obtidos pelo método da agulha de Vicat. Os resultados estão de acordo com a calorimetria: o cimento com gipsita apresenta os menores tempos de início e fim de pega, e o cimento com fosfogesso, os maiores. O cimento com fosfogesso neutralizado apresentou um comportamento intermediário, indicando que o processo de neutralização reduziu o retardo provocado pelo fosfogesso.

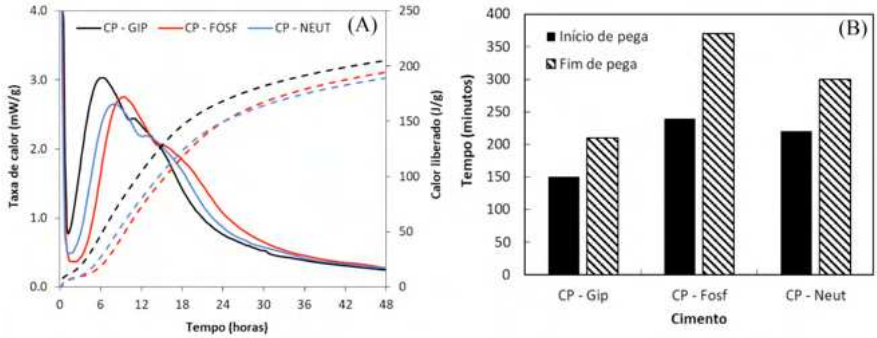


Figura 1 – (A) Taxa de liberação de calor (linhas sólidas) e calor total liberado (linhas tracejadas) e (B) tempos de início e fim de pega das pastas de cimento avaliadas

4.3 Resistência à compressão

Na Figura 2 estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos com os diferentes tipos de sulfato de cálcio. A partir da análise ANOVA e do teste Tukey, observou-se que todos os cimentos apresentavam diferenças significativas entre as suas resistências com 14 horas e com 1 dia. Os concretos com fosfogesso apresentaram resistências 48,0% e 35,9% inferiores à obtida com a gipsita, com 14 horas e 1 dia, respectivamente. A neutralização do fosfogesso resultou em aumentos de 30,3% e 21,1% na resistência à compressão com 14 horas e com 1 dia, em comparação aos concretos com fosfogesso sem tratamento. Contudo, ainda apresentou resistências 25.5% e 18.8% menores do que a do concreto com gipsita com 14 horas e com 1 dia. Em idades mais avançadas (a partir de 2 dias), as diferenças entre as resistências dos concretos avaliados diminuem (< 10%), e não são estatisticamente significativas de acordo com a análise ANOVA.

A menor resistência à compressão nos concretos com fosfogesso nas idades iniciais também foi observada nos estudos de Singh e Garg (2002) e Potgieter *et al*. (2003). Esse comportamento deve-se ao retardo na hidratação gerado pelas impurezas, o que atrasa a formação de C-S-H e, por conseguinte, o ganho de resistência mecânica. Além disso, como também observado por Potgieter e Howell-Potgieter (2001) e Potgieter *et al*. (2003), o processo de neutralização com cal hidratada foi efetivo, reduzindo o retardo no desenvolvimento mecânico nas primeiras idades, o que corrobora com o resultado de calorimetria.

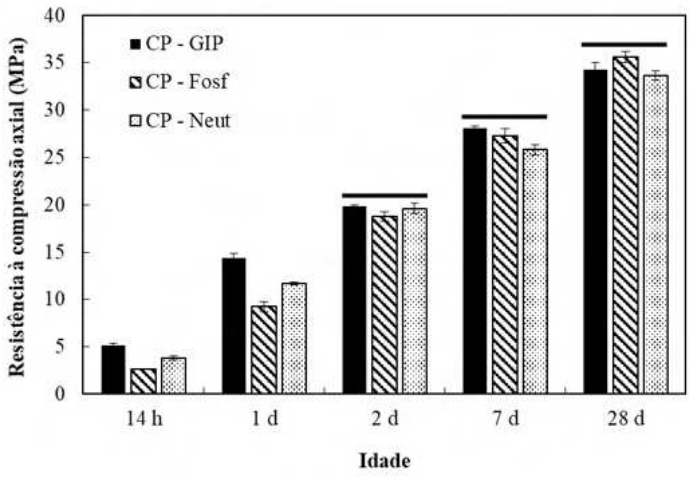


Figura 2 – Resistência à compressão de concretos com 14 horas e 1, 2, 7 e 28 dias

5 | CONCLUSÕES

A partir dos resultados de calorimetria e resistência mecânica, observou-se que a substituição de gipsita por fosfogesso resultou em um retardo na hidratação provavelmente devido às impurezas (F^- e P_2O_5) contidas neste, resultando em menores resistências à compressão nos primeiros dias. A neutralização do fosfogesso com a cal hidratada reduziu a concentração destas impurezas (principalmente o fosfato solúvel em água), reduzindo os efeitos de retardo e elevando a resistência à compressão inicial. Porém, o cimento com fosfogesso neutralizado ainda apresentou um retardo em relação ao cimento com gipsita.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland: Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Portland cement: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

3. BÉNARD, P.; GARRAULT, S.; NONAT, A.; CAU-DIT-COUMES, C. Influence of orthophosphate ions on the dissolution of tricalcium silicate. **Cement and Concrete Research**. v. 38, n. 10, p. 1137–1141, out. 2008.

4. CUADRI, A.A.; NAVARRO, F.J.; GARCÍA-MORALES, M.; BOLÍVAR, J.P. Valorization of phosphogypsum waste as asphaltic bitumen modifier. **Journal of Hazardous Materials**. v. 279, p. 11–16, ago. 2014.

5. HOLANDA, F. C.; SCHMIDT, H.; QUARCIONI, V. A. Influence of phosphorus from phosphogypsum on the initial hydration of Portland cement in the presence of superplasticizers. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 384–393, oct. 2017.

6. LIU, S.; WANG, L.; YU, B. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 9-16, jul. 2019.

7. POTGIETER, J.H.; HOWELL-POTGIETER, S.S. A plant investigation into the use of treated phosphogypsum as a set-retarder in OPC and an OPC/FLY ash blend. **Minerals Engineering**. v. 14, n. 1, p. 791–795, jul. 2001.

8. POTGIETER, J.H.; POTGIETER, S.S.; MCCRINDLE, R.I.; STRYDOM, C.A. An investigation into the effect of various chemical and physical treatments of a South African phosphogypsum to render it suitable as a set retarder for cement. **Cement and Concrete Research**. v. 33, n. 8, p. 1223–1227, ago. 2003.

9. RASHAD, A.M. Phosphogypsum as a construction material. **Journal of Cleaner Production,** v. 166, p. 732–743, nov. 2017.

10. SCRIVENER, K.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38-56, 2015.

11. SHEN, W.; GAN, G.; DONG, R.; CHEN, H.; TAN, Y.; ZHOU, M. Utilization of solidified phosphogypsum as Portland cement retarder. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 14, p. 228–233, jun. 2012.

12. SINGH, M. Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture. **Cement and Concrete Research**. v. 32, n. 7, p. 1033–1038, jul. 2002.

13. SINGH, M.; GARG, M. Production of beneficiated phosphogypsum for cement manufacture. **Journal of Scientific and Industrial Research**. v. 61, p. 533–537, jul. 2002.

14. TAYIBI, H.; CHOURA, M.; LÓPEZ, F. A.; ALGUACIL, F. J.; LÓPEZ-DELGADO, A. Environmental impact and management of phosphogypsum. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2377–2386, jun. 2009.



INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA EM ARGAMASSAS NA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO OU DO CIMENTO

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108119

TORRES; ARIELA DA SILVA[1]; PINZ; FRANCIELLI PRIEBBERNOW[1]; PALIGA; CHARLEI MARCELO[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: CHARLEI.PALIGA@UFPEL.EDU.BR

RESUMO: A reutilização de resíduos faz parte da realidade econômica e ambiental da indústria da construção civil. Neste contexto, o objetivo do trabalho é avaliar o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como substituinte, em argamassas mistas (1:2:8), ao cimento Portland e ao agregado miúdo. Os teores de substituições ao cimento foram 5%, 10% e 15% e, ao agregado miúdo, de 10%, 15% e 20%. Os resultando indicam que parâmetros físicos são mais beneficiados pela presença do RCV. Já nos mecânicos, as substituições com agregado impactam mais negativamente na resistência à compressão, e a tração na flexão não é impactada.

PALAVRAS-CHAVES: RCV, Argamassas, Reciclagem de resíduos, Tecnologia da arquitetura.

ABSTRACT: The reuse of waste is part of the economic and environmental reality of the construction industry. In this context, the objective of the work is to evaluate the red ceramic residue as a substitute, in mixed mortars (1: 2: 8), to Portland cement and as fine aggregate. The contents of substitutions to cement were 5%, 10% and 15% and, in the small aggregate, 10%, 15% and 20%. The results indicate that physical parameters are most benefited by the presence of the RCV. In the case of mechanics, substitutions with aggregate have a more negative impact on the compressive strength, and the flexural tensile strength is not impacted.

KEYWORDS: RCV, Mortars, Waste recycling, Architecture technology.

1 | INTRODUÇÃO

A indústria da cerâmica vermelha ou cerâmica estrutural, responsável por produzir blocos, tijolos e telhas, tem sua existência diretamente relacionada com a construção civil, sendo notoriamente importante para o país. A extração da argila, matéria-prima utilizada, e o processo de queima das peças são altamente nocivos. As falhas no processo produtivo das peças de cerâmica vermelha geram o resíduo de cerâmica vermelha (RCV), sendo que no Brasil, a geração deste varia de 5% a 20% da produção industrial, dependendo do nível de controle tecnológico da fábrica. Cabe ressaltar que esta indústria, no Brasil, ainda possui, em sua maioria, características bastante artesanais e de pouca tecnologia em comparação com outros ramos do setor construtivo, e consequentemente, apresenta práticas de controle de qualidade pouco eficazes, grande geração de resíduos, e relativa despreocupação com a sua destinação(1).

Existem diversos estudos que avaliaram a aplicação do RCV como substituinte

parcial ao cimento, dentre os quais podem ser citados Araújo[2] e Shao et al.[3], e ao agregado, Cabrera et al.[4] e Dang et al.[5]. No entanto, os autores concordam que as propriedades do RCV influenciam muito nas propriedades da argamassa, e estas propriedades estão diretamente relacionadas com fatores como a composição da argila utilizada como matéria-prima e o processo de queima e temperatura atingidos durante o processo de fabricação. Um exemplo disso é que em alguns casos o resíduo apresenta atividade pozolânica e outras não[6]. Além disso, destaca-se que apesar dos estudos citados, os estudos que tratam do comportamento deste resíduo em argamassas mistas ainda são poucos e incipientes.

Levando-se em consideração todos os aspectos apontados sobre a necessidade e a importância social e econômica de encontrar uma apropriada destinação e reutilização para os resíduos gerados, utilizando-se do potencial da construção civil como alternativa, e com objetivo de diminuir seus impactos ambientais, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o uso do RCV em argamassas mistas, de cimento e cal hidratada, como substituinte parcial ao agregado miúdo ou ao aglomerante, considerando os parâmetros físicos e mecânicos exigidos às argamassas convencionais.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

O RCV utilizado foi coletado em estado natural no polo ceramista da cidade de Pelotas/RS, onde vários terrenos baldios próximos as olarias servem de descarte para as empresas. Cabe ressaltar que todas as empresas locais utilizam a mesma jazida de argila, e que, portanto, tem a mesma matéria-prima. Dada a discrepância dimensional do resíduo em seu estado natural, o material foi encaminhado para o processamento, que foi feito em britador de mandíbula, por ser o método de processamento com menor consumo energético.

O material foi então caracterizado fisicamente, assim como a areia utilizada como agregado miúdo nas argamassas, seguindo-se todas as recomendações das normas da ABNT. Os resultados obtidos foram, respectivamente para o RCV e para a areia: módulo de finura de 3,57 e 2,82; massa específica de 2,44 g/cm^3 e 2,62 g/cm^3 e absorção de 10,26% e 0,66%. De acordo com os indicadores físicos obtidos na caracterização foram tomadas decisões sobre os traços de argamassa. Os valores próximos de massa específica indicaram a possibilidade de substituição em massa dos materiais. Já o elevado teor de absorção apresentado pelo RCV chamou atenção para o risco de se utilizar o mesmo fator água/cimento para todas as argamassas, tendo em vista que o próprio resíduo iria absorver água de amassamento, ocasionando em argamassas muito distintas do ponto de vista da trabalhabilidade e, possivelmente, inaplicáveis. Por isto, optou-se por trabalhar com o parâmetro de trabalhabilidade fixado, pelo índice de consistência, em 260±5mm.

Visando a utilização do mesmo resíduo como substituinte parcial ao aglomerante nas argamassas, foi feita também a caracterização química do material, para identificar a potencialidade como material pozolânico. Foram realizados os ensaios prescritos na NBR 12653[7]. Dos três parâmetros avaliados, dois deles corresponderam aos requisitos para que o material seja considerado pozolânico, com índice de atividade pozolânica

com cimento aos 28 dias de 119,57%, e soma de 85,81% dos óxidos SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3. No entanto, o RCV não apresentou o índice de atividade pozolânica com cal necessária para classificá-lo como pozolânico (0,35 MPa). Desta forma, foi necessário considerar a recomendação já feita por outros autores, e utilizar teores de substituição que não excedam 20%[2].

O aglomerante utilizado nas argamassas foi o Cimento Portland CP IV 32, tendo sido feita esta definição devido ao fato deste ser o cimento com maior quantidade de adições. Para as argamassas mistas foi utilizada cal hidratada.

2.2 Método

O traço unitário utilizado, em massa, foi 1:2:8 (cimento:cal:areia) e a substituição no agregado foi feita nos teores de 10%, 15% e 20%, igualmente distribuídas nas quatro frações do agregado miúdo das argamassas, utilizando o material peneirado nas mesmas malhas. Já as substituições no aglomerante foram realizadas nos teores de 5%, 10% e 15%, sendo importante ressaltar que, a substituição foi feita apenas pelo cimento, e não pela cal. Ao final, foram executados 7 traços de argamassas, sendo M_REF o traço referência; M_C5, M_C10 e M_C15 os traços com substituição no aglomerante; e M_A10, M_A15 e M_A20 os traços com substituição no agregado. Os mesmos foram executados em argamassadeira planetária, tendo como referência as etapas de moldagem da NBR 7215[8]. Com a especificação do valor do índice de consistência, cada traço recebeu a quantidade de água necessária para atingir este parâmetro, sendo feitas as correções necessárias sem alteração no traço.

Das argamassas foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5cmx10cm (diâmetro x altura), para a realização dos ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias, absorção por imersão e absorção por capilaridade, ambas aos 28 dias, e corpos de prova prismáticos de 4cmx4cmx16cm (largura x altura x comprimento) para o ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias. Para cada ensaio em sua respectiva idade foram moldados seis corpos de prova do mesmo traço. Os resultados foram tratados, então, através da análise estatística de variâncias de duas vias (Anova), que avalia a significância da diferença entre as médias dos resultados, identificando influência das variáveis. Foi aplicado, também, o Teste Tukey para identificar as diferenças entre os pares de médias.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Comportamento mecânico

O comportamento mecânico quanto à compressão (Figura 1) não foi tão distinto entre as duas tipologias de substituição. Além disso, fica claro o efeito do resíduo ao longo do tempo nas argamassas, visto que, os comportamentos dos traços sofrem mudanças em todos os intervalos de tempo. O próprio desvio padrão é um indicativo disto, pois observa-se que aos 7 dias o comportamento dos traços foi mais homogêneo, enquanto que aos 28 e 63 dias, o desvio padrão aumentou. Ademais, o ganho de resistência dos traços de argamassas mistas com substituição no aglomerante foi especialmente elevado nos traços M_C10 e M_C15 aos 28 dias, mas apresentaram mais uma inconsistência aos 63 dias, pois o traço M_C15 perdeu resistência no teor de quase

20%, representando uma deficiência do teor de 15% de substituição. Cabe ressaltar que o RCV não alcançou o índice necessário no ensaio de IAP com cal e, tratando-se de argamassas mistas, esta interferência pode ser atribuída a reação com a parcela de cimento da argamassa.

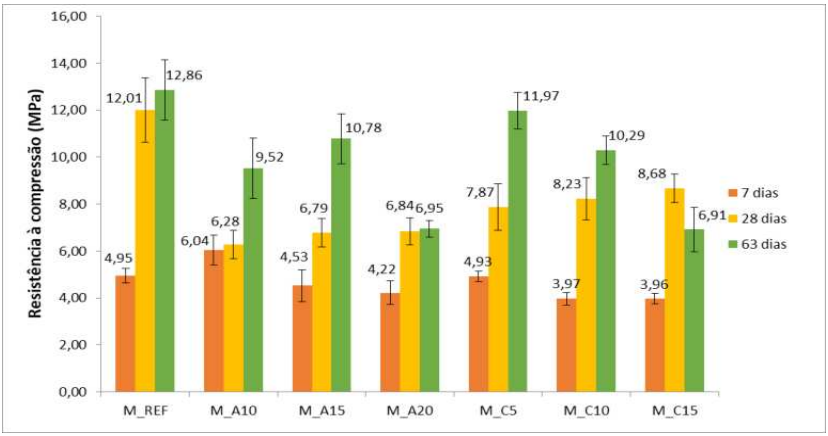


Figura 1: Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias

Fonte: Autora

Outra importante observação é o fato de que, em nenhuma das tipologias de substituição, foi possível estabelecer uma relação entre o comportamento mecânico e o teor de substituição aplicado. As substituições no agregado, aos 28 dias, interferem no comportamento das argamassas, representando menores resistências à compressão, independente do teor de substituição, como ficou evidente pela análise estatística, que indicou diferença com o traço M_REF mas igualdade entre os teores de substituição. Além disso, todos ultrapassaram o valor de 6 MPa, o que possibilita sua especificação em projetos, nas classificações de P5 e P6 da NBR 13281[9]. Desta forma, quanto a resistência à compressão ainda é possível realizar os três teores de substituição, embora, a queda de resistência indique que a substituição em outros traços deve ser avaliada.

Nos traços com substituição no aglomerante, os resultados aos 28 dias também indicam igualdade estatística de médias, não indicando a melhoria de desempenho esperada. Estas análises possibilitam a indicação de argamassas mistas com 15% de substituição no cimento, considerando o fato de que as três testadas são iguais, e de que todos os traços apresentaram valores usuais de acordo com a NBR 13281[9]. No entanto, na análise estatística para os resultados de compressão aos 63 dias, é possível identificar uma queda no desempenho relacionada com o aumento do teor de substituição no aglomerante. O traço M_C5 foi o único que obteve igualdade de comportamento com o traço referência, de acordo com a estatística, enquanto que os outros dois traços tiveram resistência inferior. Além disso, todos os traços com substituição no aglomerante obtiveram resistências à compressão diferentes entre si, indicando a interferência do RCV ao longo do tempo nas argamassas, dada sua não reatividade com a cal. A partir disto, a substituição do aglomerante no teor de 5% pode

ser mais recomendável.

No teste mecânico referente à resistência à tração na flexão das argamassas mistas, com resultados apresentados na Figura 2, novamente não foi possível verificar relação entre as tipologias e os teores de substituição e os resultados apresentados. No entanto, destacaram-se os elevados desvios padrão, especialmente nos traços com maiores teores de substituição, M_C15 e M_A20.

Em ambas as tipologias, os maiores teores de substituição representaram os maiores valores de resistência. No entanto, a primeira etapa da análise estatística não identificou nenhuma diferença significativa nas médias, uma vez que o p-value encontrado para a análise da interferência dos teores de substituição foi de 0,551092744 para os traços com substituição o agregado, e 0,119059191 pata os traços com substituição no aglomerante. Ficando, assim, comprovado que os traços apresentaram igualdade de comportamento, indicando que os teores das substituições não causaram real impacto na resistência à tração na flexão das argamassas mistas, com uma significância de 95%. Sendo assim, quanto à substituição no agregado, seria possível recomendar a substituição no maior teor analisado, embora considerando o desvio padrão, a recomendação mais segura seja para o teor de 10%. O mesmo pode ser dito para as substituições no aglomerante, onde apesar de todos os traços terem apresentado igualdades de média, o traço com maior teor de substituição obteve o maior valor de resistência, e também o maior desvio padrão.

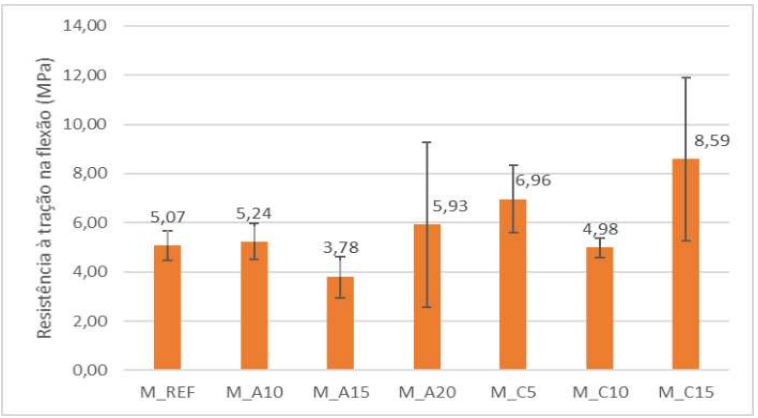


Figura 2: Resultados de resistência à tração na flexão

Fonte: Autora

3.2 Desempenho físico

Os resultados das argamassas mistas quanto à absorção por capilaridade (Figura 3) foram bastante promissores, tendo em vista que apenas um dos traços (M_A20) obteve um valor de absorção superior ao traço M_REF. Chama atenção o fato do traço M_A20 ter absorvido o dobro de água por unidade de área em relação aos demais traços com substituição no agregado, mas deve-se destacar o elevado desvio padrão

que estes traços apresentaram.

Ao testar a absorção por imersão, tendo sido mostrados os resultados através da Figura 3, todos os traços com substituições no agregado absorveram uma porcentagem de água maior que o traço referência, além de que, observa-se aumento dessa porcentagem conforme o aumento do teor de substituição, da mesma forma que o índice de vazios aumenta no mesmo padrão.

Os resultados da análise estatística indicaram que nem a elevação na absorção do traço M_A20, nem a redução nos demais traços, foram estatisticamente relevantes, afirmando que todos se comportaram iguais ao traço referência, ao passo que, quanto à absorção por capilaridade as argamassas mistas não foram afetadas pela substituição do agregado pelo RCV. O fato das argamassas com RCV como agregado se equipararem ao traço referência, mesmo com a elevada absorção apresentada pelo resíduo, pode estar relacionado com a mudança na estruturação interna das argamassas com uso de RCV como agregado miúdo, uma vez que o resíduo pode colaborar fechando os poros internos da mistura. Já quanto às substituições no aglomerante, o traço M_C5 absorve menos água entre todos os grupos, e teve seu desempenho mais apropriado, comprovado pela análise estatística, que identificou a diferença de médias em comparação com o traço referência.

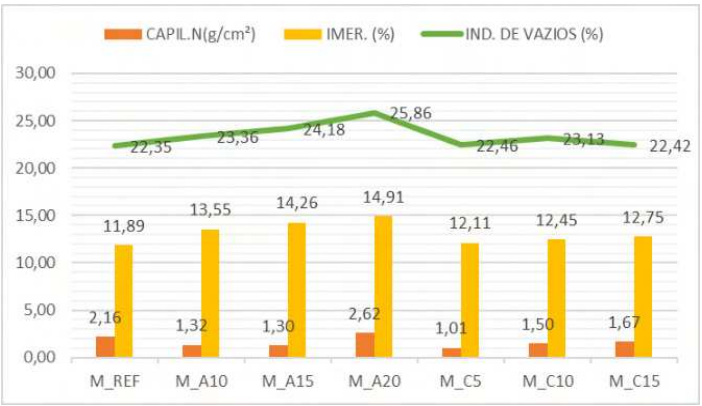


Figura 3: Parâmetros físicos das argamassas mistas

Fonte: Autora

Os resultados da análise estatística, pelo Teste de Tukey, identificaram ocorrência de diferença entre todas as médias das substituições no agregado, tanto em comparação com o traço referência, quanto entre as substituições, indicando não apenas que o RCV interfere na absorção por imersão, mas também a queda de desempenho aumenta conforme aumenta o teor de substituição. Estes resultados reafirmam a hipótese de Cabrera et al.[4] de que o RVC como agregado miúdo, em argamassas mistas, implica em argamassas mais porosas, com influência do teor de substituição.

Já para as substituições no aglomerante, embora os valores também tenham sido superiores ao traço M_REF, a análise estatística indicou que apenas o traço M_C10

de fato apresentou maior absorção em comparação ao traço referência, enquanto os teores de 5% e 15% de substituições se enquadraram na hipótese de igualdade entre as médias, o que indica que a interferência do RCV nas argamassas mistas, quanto à absorção, é menor quando a substituição é feita no aglomerante.

Considerando a elevada absorção apresentada pelo resíduo de RCV na caracterização física, mesmo a estabilidade do comportamento indica uma atuação positiva do RCV nas argamassas. Sendo assim, do ponto de visto do desempenho físico, é necessário descartar a recomendação do traço M_A20, pois representou comportamento fora dos padrões mínimos em todos os parâmetros testados.

4 | CONCLUSÕES

Considerando todos os aspectos abordados, a substituição do cimento pelo RCV das argamassas mistas se mostrou a mais eficiente, pois as interferências mecânicas causadas não inviabilizam sua utilização frente aos esforços das argamassas, e atendem as classificações da norma NBR 13281[9]. E além disso, esta tipologia causou ainda uma melhora de desempenho físico, com diminuição da absorção de água e comportamento muito similar ao traço M_REF. Cabe destacar que qualquer melhoria no desempenho físico é de extrema importância para as argamassas, especialmente das argamassas de revestimento, que são frequentemente danificadas pelas ações da água. Os dados apresentados apontam que a utilização do RCV é uma realidade do ponto de vista dos parâmetros básicos de argamassa, o que abre um vasto leque de possibilidades dentro da construção civil.

REFERÊNCIAS

1. HANSEN, D. M.; BREHM, F. A.; KULAKOWSLI, M. P. Avaliação da geração de resíduo de cerâmica vermelha. *In:* Anais do 7° FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, Porto Alegre, jun. 2016.

2. ARAÚJO, A. R. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

3. SHAO, J.; GAO, J.; ZHAO, Y., CHAO, X. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. **Construction and Building Material**, v. 213, p. 209-215, 2019.

4. CABRERA, F. G. C.; SOBERÓN, J. M. G.; SÁNCHEZ, J. L. A.; REA, S. P. A.; HIGUERA, R. C. Mechanical properties of mortar containig recycled ceramic as fine aggregate replacement. **Revista de la Construcción**, v. 14, n. 3, p. 22-29, dez. 2015.

5. DANG, J.; ZHAO, J.; HU, W.; DU, Z.; GAO, D. Properties of mortar with waste clay brick as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 898-907, mar. 2018.

6. CASTRO, A. L.; SANTOS, R. F. C.; GONÇALVES, K. M.; QUAIONI, V. A. Caracterização de cimento compostos com resíduo da indústria da cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**, v. 63, n. 365, jan./mar. 2017.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2001.



DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO E SIDERURGIA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081110

BARRETO; RODRIGO RONY[1]; MENDES; VITOR FREITAS[1]; FARDIN; WELINGTON[1]; SANTANA; VANESSA PEREIRA[1]; MENDES; JULIA CASTRO[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: VANESSA.SANTANA@ALUNO.UFOP.EDU.BR

RESUMO: Este estudo avalia o desempenho térmico de argamassas de revestimento produzidas com a substituição total do agregado natural por três resíduos: Rejeito de Barragem de Minério de Ferro, Quartzito Friável e Escória de Aciaria. Foram realizadas simulações energéticas de uma habitação de interesse social, no software EnergyPlus. Como resultado, as argamassas de resíduos obtiveram desempenho térmico similar ou superior às convencionais, com destaque para a de escória de aciaria. Isso ocorreu devido à alta capacidade térmica e baixa condutividade térmica desse material. Assim, argamassas de resíduo são alternativas promissoras para melhorar o desempenho térmico de edificações no Brasil.

PALAVRAS-CHAVES: Desempenho térmico; matrizes cimentícias; resíduos da mineração e siderurgia; simulação energética.

ABSTRACT: This study evaluates the thermal performance of coating mortars produced with the total replacement of the natural aggregate by three residues: Iron ore tailing, Friable Quartzite and Steel Slag. Energy simulations of low-income housing were carried out using the EnergyPlus software. As a result, waste mortars obtained thermal performance similar to or superior to conventional ones, with emphasis on steel slag. This was due to the high thermal capacity and low thermal conductivity of this material. Thus, waste mortars are promising alternatives to improve the thermal performance of buildings in Brazil.

KEYWORDS: Thermal performance; cementitious matrices; mining and steel wastes; energy simulation.

1 | INTRODUÇÃO

A geração de resíduos dos setores da mineração e siderurgia e o seu armazenamento de forma imprudente vem causando sérios problemas econômicos, ambientais e sociais. Nesse cenário, o setor da construção civil se apresenta como uma potencial solução, devido a sua grande capacidade de incorporação destes resíduos na produção de materiais e sistemas construtivos. Por isso, nos últimos anos, em todo o mundo, diversos resíduos industriais vêm sendo investigados para emprego na construção civil, tais como o Rejeito de Barragem de Minério de Ferro (RBMF), o Quartzito Friável (QTZ) e a Escória de Aciaria (EA).

O QTZ é oriundo do corte de quartzito comercial não tem aproveitamento

econômico como material de revestimento e, por isto, é definido como estéril da lavra [1]. Segundo Mendes [2], o uso deste resíduo em compósitos cimentícios é viável, desde que o mesmo não seja altamente intemperizado. Assim, diversos estudos atestam o potencial de aplicabilidade do QTZ no setor da construção, tais como para a produção de argamassas de assentamento e revestimento [3] e para produção de argamassas colantes [1].

O RBMF, subproduto resultante dos processos de beneficiamento do minério de ferro, também foi estudado para produção de argamassas para assentamento e revestimento [4]. Há ainda estudos que investigam a aplicação deste resíduo em revestimentos cerâmicos e hidráulicos [5], usando o RBMF como agregado e como pigmentos para tintas imobiliárias [6].

A EA, por sua vez, é um resíduo proveniente da cadeia produtiva de aço no setor siderúrgico, gerado durante o processo inicial de refino [7]. A viabilidade da incorporação deste resíduo na produção de materiais de construção já foi verificada em estudo para produção de blocos de alvenaria e argamassas [8]. A EA também foi utilizada para a produção de concretos com reduzido consumo de cimento [9].

Contudo, mesmo demonstrando grande potencial para aplicabilidade no setor da construção, ainda há uma lacuna de pesquisas sobre o desempenho térmico desses resíduos quando incorporados a elementos construtivos. Além disso, no Brasil, a preocupação em se construir edificações com um melhor desempenho térmico ainda é pequena. As habitações brasileiras, principalmente aquelas construídas por programas de financiamento sociais, não são projetadas de acordo com as características de sua zona bioclimática, nem com materiais que garantiriam maior conforto térmico para os moradores [10].

Neste sentido, a escolha dos materiais adequados de acordo com o local da construção pode influenciar no desempenho térmico da edificação e no conforto dos usuários. Além disso, os materiais do sistema de vedação desempenham um papel fundamental em relação à sustentabilidade, pois influenciarão na necessidade de aquecimento/resfriamento artificial do ambiente interno durante todo o ciclo de vida da edificação [11].

Assim sendo, este trabalho investiga o desempenho térmico de argamassas de revestimento produzidas com resíduos em substituição de 100% do agregado natural. Como o sistema de revestimento é um dos principais fatores que influenciam no desempenho térmico de uma edificação [12], a utilização dessas argamassas permite a avaliação seu efeito neste sistema.

2 | METODOLOGIA

Neste trabalho foi analisado o desempenho térmico de uma edificação de interesse social, na qual se utilizou argamassas de revestimento produzidas com resíduos QTZ, RBMF e AE, através de simulações energéticas. As simulações foram feitas com o software EnergyPlus para um período de um ano. Foram consideradas cidades que representam cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras, conforme detalhado a seguir.

2.1 Descrição da edificação do estudo de caso – Vila Sustentável

A Vila Sustentável, objeto deste estudo, é uma habitação de interesse social localizada no campus da Universidade Federal de Ouro Preto, que foi desenvolvida visando proporcionar conforto e segurança para populações de baixa renda de forma sustentável. As características do projeto como geometria, dimensões e método construtivo foram utilizadas como dados de entrada da simulação. Mais informações sobre esse projeto pode ser vistas em trabalhos anteriores [8].

A avaliação do desempenho térmico das argamassas de resíduos como material de vedação foi realizada para as oito zonas bioclimáticas do país, definidas conforme a NBR 15220. A Tabela 1 exibe as cidades utilizadas no modelo da edificação para as simulações energéticas.

Zona Bioclimática	Cidade Simulada
1	Curitiba – PR
2	Camaquã – RS
3	São Paulo – SP
4	Brasília – DF
5	Vitória da Conquista – BA
6	Campo Grande - MS
7	Cuiabá – MT
8	Manaus - AM

Tabela 1 - Cidades utilizadas e sua respectiva zona bioclimática.

2.2 Propriedades termofísicas das argamassas

As características térmicas e físicas das argamassas simuladas foram obtidas em estudos anteriores [2,13] onde houve a substituição total do agregado miúdo convencional pelos resíduos investigados. A Tabela 2 exibe as propriedades das argamassas utilizadas como dados de entrada para a simulação computacional e análise do desempenho térmico das edificações. O valor da espessura das argamassas foi padronizado em 0,02 m e o traço em 1:1:6 (cimento:cal:agregado), tipicamente adotado para revestimento de alvenarias.

Resíduo	Condutividade Térmica - λ (W/mK)	Diferença de λ em relação à REF (%)	Calor Específico - c (J/(kg.K)	Massa Esp. Aparente - ρ (kg/m³)	Densidade energética (MJ/K)	Diferença de Densidade Energética em relação à REF (%)
REF	0,98	0%	722	1831	1,32	0
EA	0,72	-26%	720	2442	1,76	+33%
QTZ	0,94	-4%	748	1754	1,31	-0,7%
RBMF	0,49	-50%	753	1821	1,37	+3,8%

Tabela 2 - Características termofíscas das argamassas.

Fonte: adaptado de Mendes (12)

2.3 Análise dos dados: Método das diferenças acumuladas

Para a análise dos resultados das simulações, adotou-se o Método das Diferenças Acumuladas. Este método foi elaborado pelo grupo de pesquisa dos autores com o objetivo de comparar o desempenho térmico de diferentes materiais de construção. O método consiste em medir e somar a diferença entre a temperatura horária externa e interna ao longo de todo o ano. Estas somas são realizadas de forma separada (soma das positivas e soma das negativas). Posteriormente, um acumulado total é calculado, somando-se os módulos dos acumulados positivo e negativo. Dessa forma, os materiais que apresentam um melhor desempenho térmico são caracterizados pelo maior acumulado total de diferenças entre a temperatura interna e externa.

A Figura 1 apresenta essa metodologia em um gráfico que retrata um período de 3 dias de uma simulação genérica. A linha tracejada indica a temperatura no interior da edificação, a linha contínua mostra a temperatura externa à edificação e, por fim, as barras representam as diferenças entre as temperaturas externas e internas. Neste trabalho, essa análise foi realizada para todas as argamassas testadas.

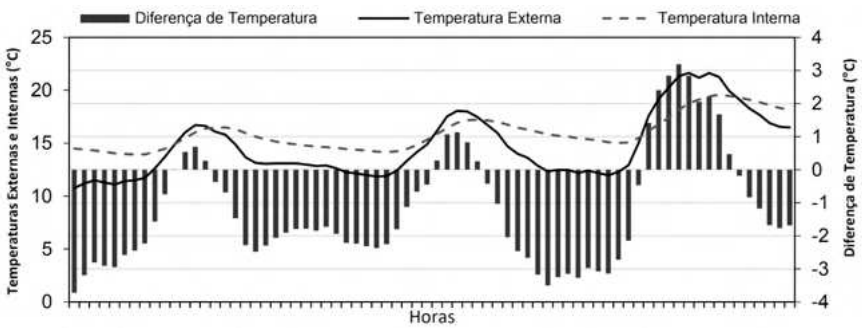


Figura 1 - Método Das Diferenças Acumuladas

Fonte: os autores

3 | RESULTADOS

3.1 Desempenho térmico das argamassas: acumulado positivo

A Figura 2 apresenta os resultados das análises das simulações energéticas quando a temperatura exterior se manteve acima da temperatura interior (acumulado positivo) da edificação ao longo de um ano, para cada zona bioclimática brasileira. É possível observar que o comportamento das argamassas se manteve semelhante em todas as zonas simuladas.

De modo geral, as argamassas de REF e de QTZ apresentaram valores próximos enquanto as argamassas produzidas com RBMF e EA acumularam maiores valores de diferença entre os ambientes interno e externo ao longo do ano, chegando a 14.938 °C para a argamassa de EA na zona 7. Isso significa que somente a troca dos agregados naturais por EA na argamassa de revestimento permitiu que 174°C fossem "economizados" no interior da edificação ao longo do ano. Por isso, as argamassas de RBMF e de EA demonstraram um potencial maior de isolamento em períodos quentes.

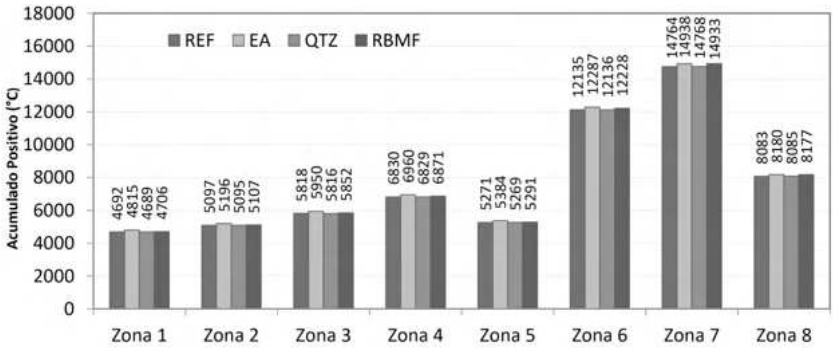


Figura 2 - Acumulativo Positivo das argamassas simuladas para cada zona bioclimática brasileira

Fonte: os autores

Este fenômeno pode ser associado ao fato de as argamassas de RBMF e EA apresentarem valores menores de condutividade térmica, (0,49 e 0,72 W/(m·K) respectivamente), quando comparadas com a condutividade da argamassa de REF (0,98 W/(m·K)), conforme apresentado na Tabela 2. A baixa condutividade térmica dessas argamassas está correlacionada à microestrutura da matriz cimentícia e seu sistema de poros [14].

Os maiores valores de acumulados positivos para a argamassa de EA também podem ser justificados pela sua maior massa específica e calor específico e, consequentemente, pela maior capacidade térmica. A argamassa de EA apresentou uma densidade energética 33% maior que a argamassa de REF (Tabela 2). Por isso, essa argamassa necessita de uma maior quantidade de energia para aumentar sua temperatura e é capaz de reter mais calor, o que deixa a edificação menos exposta às variações externas de temperatura.

3.2 Desempenho térmico das argamassas: acumulado negativo

A Figura 3 apresenta os resultados das análises das simulações energéticas quando a temperatura exterior se manteve abaixo da temperatura interior da edificação, para cada zona bioclimática brasileira. Da mesma forma que os acumulados horários negativos, em cada zona, as argamassas de QTZ e RBMF se comportaram de forma semelhante às argamassas de REF. O RBMF possui densidade energética muito próxima à da argamassa de REF (apenas 3,8% maior), conforme apresentado na Tabela 2. Por isso, possivelmente, para períodos com temperaturas baixas, a argamassa de RBMF não se mostra tão eficiente para o isolamento quanto em períodos quentes. Devido à sua baixa densidade energética, a argamassa de RBMF não acumula tanto calor durante o dia e não transfere para o interior da edificação durante o período da noite.

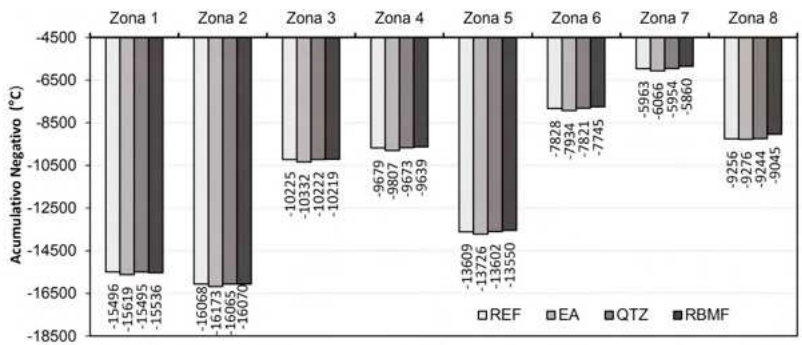


Figura 3 - Acumulativo Negativo de cada argamassa simulada para cada zona bioclimática brasileira

Fonte: os autores

As argamassas de EA mostraram, em todas as zonas, melhores desempenhos térmicos que as demais argamassas estudadas. A variação entre a argamassa de EA e a argamassa de REF chegou a -129 °C. De modo semelhante aos resultados de Acumulado Positivo, o melhor desempenho da argamassa de EA pode ser associado à sua maior densidade energética quando comparada as demais argamassas. Essa característica proporciona ao material uma maior retenção de calor e consequentemente reduz as perdas de calor excessivas no inverno e os ganhos elevados no verão [13].

3.2.1 Acumulado total

A Figura 4 apresenta os resultados das análises das simulações energéticas com o somatório dos acumulados positivo e negativo, em módulo, para cada zona bioclimática brasileira. Assim como nos resultados anteriores, as argamassas apresentaram comportamentos semelhantes em todas as zonas.

De modo geral, argamassa de EA demonstrou os melhores resultados no desempenho térmico quando comparada às demais, proporcionando à edificação o melhor isolamento térmico. Os valores de variação para este tipo de argamassa se

apresentaram melhores que as argamassas de REF entre 118 °C (zona 8) e 277 °C (zona 7) ao longo do ano. A argamassa de QTZ teve resultados semelhantes às argamassas de REF em todas as simulações. Como visto anteriormente, esses resultados estão relacionados às propriedades termofísicas destes rejeitos (Tabela 2).

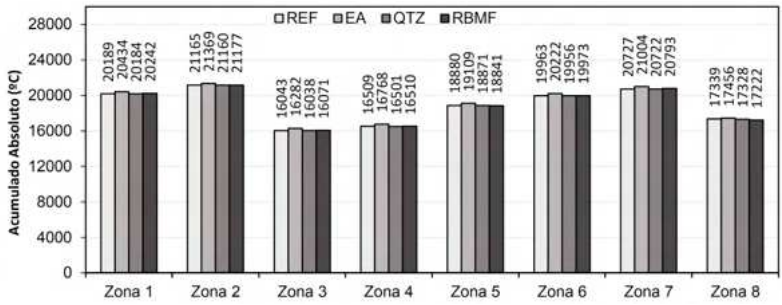


Figura 4 - Acumulativo Total de cada argamassa simulada para cada zona bioclimática brasileira

Fonte: os autores

A argamassa de RBMF, por sua vez, teve um comportamento similar à de REF para o acumulado negativo e melhores resultados para o acumulado positivo. Dessa forma, para o acumulado absoluto, a argamassa de RBMF teve um comportamento semelhante à argamassa de REF nas zonas 2, 3, 4, 5 e 6 e se mostrou melhor que a argamassa de REF nas zonas 7 e 1, com economia energética de 66 °C e 54 °C, respectivamente. Isso se deve à baixa condutividade térmica das argamassas de RBMF quando comparada à argamassa de REF. Essa condutividade térmica reduzida atrasa a transferência de calor entre os ambientes, fazendo com que assim se tenha uma maior diferença entre a temperatura externa e interna, resultando em um acumulado absoluto maior.

4 | CONCLUSÕES

A avaliação do desempenho térmico das argamassas produzidas com resíduos EA, QTZ e RBMF foi realizada a partir de simulações energéticas em uma habitação de interesse social. As simulações permitiram avaliar se as argamassas produzidas com estes resíduos conferem alguma melhoria no desempenho térmico da edificação para as diferentes regiões do país.

As propriedades termofísicas das argamassas de resíduos influenciaram diretamente nos resultados de desempenho térmico. As argamassas de EA apresentaram os melhores resultados em todas as análises e para todas as zonas, proporcionando uma redução de temperatura à edificação de até 277 °C ao longo do ano se comparada a uma argamassa convencional (REF). A argamassa de RBMF, dependendo da zona em que é aplicada, pode proporcionar uma economia de até 169 °C. Esta teve melhor desempenho em regiões de climas mais quentes. Já a argamassa de QTZ se manteve semelhante às argamassas de REF, com diferenças inferiores a 10 °C.

Assim, as argamassas de resíduos se mostraram promissoras, pois, além

de reduzirem os impactos ambientais causados pela disposição dos resíduos, proporcionaram desempenho térmico similar ou superior às edificações em todo país.

REFERÊNCIAS

1. DIAS, L. S. et al. Rejeitos de mineração de quartzito para produção de argamassa colante. Anais do 22º CBECiMat. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2017.

2. MENDES, J. C. **Thermal Properties of Cement-based Composites**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.

3. SANTOS, D. **Substituição total do agragado natural por auartzito friável para produção de argamassas de assentamento e revestimento**.Universidade Federal De Ouro Preto. 2015.

4. FONTES, W. C. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988–995, 2016.

5. FONTES, W. C. **Studies on the use potential of iron ore tailings as alternative raw material in manufacture of ceramic and hydraulic tiles**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

6. GALVÃO, J. L. B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, July 2018.

7. COSTA, L. C. B. **DESEMPENHO DE CONCRETOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA FRENTE A ATAQUE DE CLORETOS**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.

8. FRANCO, L. C. et al. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. **Sustainable Cities and Society**, 2019.

9. CARVALHO, J. M. F. et al. Low Environmental Impact Cement Produced Entirely from Industrial and Mining Waste. **Journal of Materials in Civil**, v. 31 (2), p. 04018391, 2019.

10. MORENO, A. C. R.; MORAIS, I. S. D.; SOUZA, R. V. G. D. Thermal Performance of Social Housing - A Study Based on Brazilian Regulations. **Energy Procedia**, p. 111 - 120, 2016.

11. PACHECO, R.; ORDÓNEZ, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Granada, Spain , 2012.

12. SADINENI, S.; MADALA, ; BOEHM,. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 3617–3631, 2011.

13 MENDES, J. C. et al. Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars. **Construction and Building Materials**, Novembro 2019.

14. MENDES, J. C. et al. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, July 2019.



CARBONATAÇÃO NATURAL EM CONCRETO COM RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM SUBSTITUIÇÃO AO AGLOMERANTE

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081111

COSTA; VITÓRIA SILVEIRA DA[1]; TEIXEIRA; FERNANDO RITIÉLE[1]; PALIGA; CHARLEI MARCELO[1]; TORRES; ARIELA DA SILVA[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: CHARLEI.PALIGA@UFPEL.EDU.BR

RESUMO: Este trabalho avaliou a influência da substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) no processo de carbonatação do concreto em ambiente natural nas cidades de Pelotas/RS e Rio Grande/RS. O resíduo foi utilizado em proporções de 5%, 7,5% e 10% de substituição em massa ao cimento. Os resultados mostraram diferença entre o traço referência e os concretos com resíduo, e também diferenças entre as cidades, com Rio Grande apresentando as menores médias de carbonatação.

PALAVRAS-CHAVES: Tecnologia da arquitetura, Concreto, Reciclagem, Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, Carbonatação.

ABSTRACT: This work evaluated the influence of partial replacement of Portland cement by residue from ornamental stone processing in the concrete carbonation process in a natural environment in the cities of Pelotas/RS and Rio Grande/RS. The residue was used in proportions of 5%, 7.5% and 10% replacement in mass to cement. The results showed differences between the reference mix and concrete with residue, and differences between cities, with Rio Grande presenting the lowest carbonation averages.

KEYWORDS: Architecture technology, Concrete, Recycling, Residual from the processing of ornamental rocks, Carbonation.

1 | INTRODUÇÃO

Na construção civil, um dos processos com grande volume de geração de resíduos é o da produção de rochas ornamentais. Os resíduos gerados pelas marmorarias apresentam dimensões variadas, desde grãos de pó até fragmentos maiores de formatos diversos, os quais muitas vezes são depositados em locais inadequados ou despejados na natureza, sem o descarte adequado. Muitas das empresas não sabem gerir seus resíduos e os deixam acumulados nos terrenos em torno da marmoraria ou os destinam aos depósitos de resíduos do município. Sem o devido tratamento, parte dos resíduos em forma de pó são levados por lixiviação e despejadas nos cursos d`água, contaminando diretamente os rios e solos, além de desfigurar a paisagem, o que causa preocupação na população e nas autoridades (NEGREDO(1)).

Entre os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto, a carbonatação se destaca como um dos principais agentes iniciadores da corrosão das armaduras,

especialmente em aglomerações urbanas, em função da alta concentração de automóveis, que produzem o dióxido de carbono (LEEMANN e LOSER[2]).

A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono no ar penetra na superfície do concreto e se dissolve na água dos poros formando ácido carbônico. O ácido carbônico reage então com o hidróxido de cálcio, esse ácido reage com alguns componentes da matriz cimentícia e resulta em carbonato de cálcio, que baixa o pH do concreto para valores próximos de 8,5. A carbonatação avança em direção ao interior do concreto e quando alcança a armadura ocorre a despassivação do aço (TIMOSHIN e AIKI[3]).

Paralelo a problemática exposta, atualmente pesquisas (GHORBANI et al.[4]; ASHISH[5]; KHODABAKHSHIAN et al.[6]; SINGH et al.[7]; entre outros) têm se mostrado bastante promissoras quanto à incorporação de resíduos do setor industrial em concretos, como forma de reduzir o consumo de matérias-primas não renováveis, e até mesmo melhorar as propriedades do mesmo.

Entre esses subprodutos estão os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, em 2017 a produção de rochas no Brasil foi de aproximadamente 9,24 Mt, sendo 1,046 Mt para exportação. Salienta-se que, em volume, 41% dos blocos de rochas são transformados em rejeitos, gerando cerca 3,36 Mt de material descartável durante o processamento das rochas ornamentais.

Desta maneira, visando uma utilização sustentável desses rejeitos, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho de concretos com substituição parcial do cimento pelo RBRO frente ao processo de carbonatação natural em diferentes cidades.

2 | METODOLOGIA

A seguir são apresentadas as características dos materiais utilizados na confecção dos concretos estudados.

O RBRO, coletado na forma de lama, foi gerado por uma empresa local de beneficiamento de rochas ornamentais, a qual trabalha com rochas metamórficas de origem calcária (mármore – principais constituintes são a calcita e a dolomita) e rochas magmáticas (granito – principais constituintes são o quartzo, mica e feldspato). A coleta, seguindo a ABNT NBR 10007:2004[8], foi feita diretamente no tanque de decantação da empresa, sendo que todo o material utilizado no trabalho foi coletado no mesmo dia. Após a coleta, o material passou por um processo de homogeneização e quarteamento para a obtenção de uma amostra representativa. Na sequência, a lama do RBRO foi colocada em estufa devido ao seu grande volume, onde permaneceu por 24 horas a uma temperatura de 105°C. Em seguida, o resíduo foi passado na peneira de abertura 1,18 mm para retirada da granalha de aço e destorroamento, eliminando, desta forma, a necessidade de moagem. Uma vez destorroado, o resíduo foi passado na peneira de abertura da malha de 300 µm e armazenado em sacos, estando pronto para ser utilizado. A granulometria do RBRO foi determinada em granulometria a laser da Cilas, modelo 1064. A análise da curva mostra que o diâmetro médio de partícula do RBRO é de 30,95 µm.

Para identificar a presença de elementos cristalinos na composição do RBRO foi realizada uma análise de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 6000, com o resultado apresentado através da Figura 1. Fazendo-se uma análise foi possível verificar que o RBRO em estudo é constituído principalmente por Quartzo (Q) e Albita (A). Pode ser observado, também, picos menos intensos de Microclina (M) e Biotita (B). Através do ensaio foi constatada a não pozolanicidade do RBRO em decorrência do mesmo apresentar um pico cristalino bem definido referente ao quartzo (SiO_2) e ausência de halo amorfo.

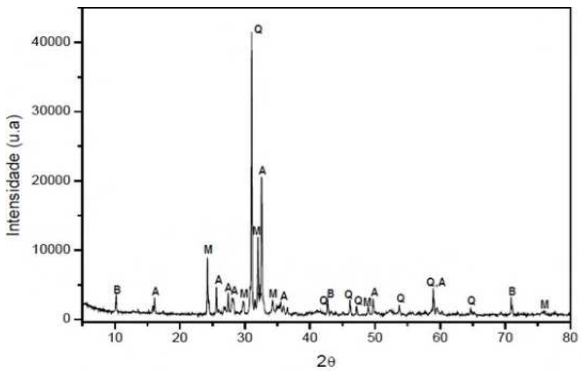


Figura 1 – Difratograma de raios X obtido para amostra de RBRO

Fonte: Autores

Para determinação da composição química do RBRO utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de energia, modelo Shimadzu EDX-720. A soma dos óxidos SiO_2 (34,085 %), Al_2O_3 (18,77 %) e Fe_2O_3 (12,57%) foi de 62,42%, o que segundo a ABNT NBR 12653:2014[9] não é considerado um material pozolânico, apresentando apenas efeito físico, o que corrobora com o apontado a partir do DRX. Além disso, o teor de CaO do resíduo foi de 12,18%.

O RBRO apresentou massa específica de 2,64 g/cm³, segundo a ABNT NBR NM 23:2001[10] e massa unitária de 1,16 g/cm³ conforme a ABNT NBR NM 45:2006[11]. Já o agregado miúdo apresentou módulo de finura de 2,84, diâmetro máximo de 4,75 mm, massa específica de 2,62 g/cm³ e massa unitária de 1,55 g/cm³. A brita foi classificada como brita 1, com diâmetro máximo de 19 mm, módulo de finura de 4,69, massa específica de 2,60 g/cm³ e massa unitária de 1,41 g/cm³. Todos os ensaios de caracterização dos materiais seguiram as recomendações das normas vigentes da ABNT.

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), tendo sido escolhido por conter o maior teor de clínquer dentre os cimentos disponíveis.

Para a dosagem dos concretos utilizou-se a metodologia do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN[12]). Definiu-se a relação água/cimento de 0,60, por ser o valor máximo considerado para um concreto estrutural, localizado em ambiente urbano, de acordo

com a ABNT NBR 6118:2014[13]. Através do procedimento experimental definiu-se o teor de argamassa seca ideal em 51% (α = 0,51) e a quantidade de água necessária para a obtenção do abatimento do tronco de cone em 70 ± 10 mm. A partir do traço de referência (1:0:2,4:3,28:0,60 – cimento:RBRO:areia:brita: fator a/c) foi realizada a substituição parcial do cimento pelo RBRO em teores de 5%, 7,5% e 10%.

2.1 Ensaio natural de carbonatação

Na cidade de Rio Grande/RS, as amostras, com relação diâmetro x altura de 10x20cm, foram expostas em ambiente urbano com umidade relativa anual superior à 70% e desprotegidas da ação do ambiente (temperatura e água da chuva). Foi escolhido como local de exposição o Campus Carreiros da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), localizado a 1,2 km do Porto de Rio Grande, expostos ao ar livre sobre uma marquise no prédio do Laboratório da Escola de Engenharia, conforme demonstra a Figura 2a.

A cidade de Pelotas/RS encontra-se afastada aproximadamente 60 km de região marítima, e está localizada às margens do canal São Gonçalo, que liga as Lagoas dos Patos e Mirim. Assim, as amostras foram expostas em ambiente urbano com umidade relativa anual superior à 80% e protegidas parcialmente por uma laje da ação do ambiente (temperatura e água da chuva). Os corpos-de-prova foram expostos no Campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas, localizado no bairro Porto, zona sul da cidade, à beira do Canal São Gonçalo, cerca de 50 metros. Os corpos de prova, conforme a Figura 2b, foram dispostos no segundo pavimento de uma estrutura de concreto coberta por uma laje, e possuíam dimensões de 10x20cm (diâmetro x altura).



(a) (b)

Figura 2 – Local de exposição das amostras na cidade de Rio Grande (a) e Pelotas (b)

Fonte: Autores

2.2 Medida da profundidade de carbonatação

Na idade de 18 meses os corpos-de-prova (3 por amostra) foram rompidos à

tração por compressão diametral e, após, foi aplicada para a verificação da espessura da camada carbonatada a solução de fenolftaleína composta por 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada. Esta substância química torna o concreto não carbonatado (pH ≥12) vermelho carmim e permanece incolor no concreto carbonatado (pH< 9).

A verificação da profundidade da carbonatação se deu por meio de imagens digitais e o auxílio do software AutoCAD (Figura 3). Para a medição da profundidade de carbonatação foi utilizada a preconização da NT BUILD 492[14], que determina verificar medidas a cada 10 mm, sendo o resultado a média entre todas elas.

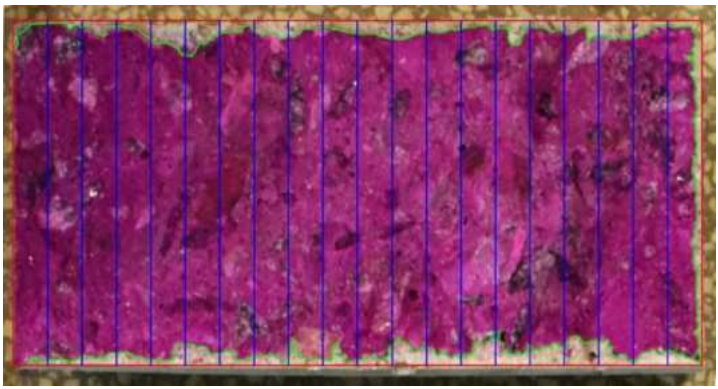


Figura 3 – medida de profundidade de penetração de cloretos

Fonte: Autores

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4a apresenta a média simples das medidas realizadas de profundidade de carbonatação. Analisando entre as cidades de exposição, Rio Grande teve menores médias de carbonatação nos concretos com resíduo, demonstrando que no ambiente marinho o concreto teve um melhor comportamento.

Quando os poros estão saturados, a velocidade de transporte do CO_2, que ocorre por difusão, diminui excessivamente. Segundo Bary e Sellier[16], as maiores velocidades de carbonatação ocorrem em umidades entre 40% a 80%, ou ainda entre 50% e 70%, de acordo com Thiery et al.[17]. No período deste estudo, a cidade de Pelotas teve média de 88% de UR, enquanto Rio Grande 76%, de acordo com Estação Agroclimatológica da região, o que não confere com os resultados destes estudos, que afirmam que maiores umidades relativas reduzem a profundidade de carbonatação, pois a cidade de Pelotas apresentou maiores médias e maiores valores absolutos de profundidade quando comparados os traços com RBRO, conforme as Figuras 4a e 4b. Porém, como não foi medido o teor de concentração de CO_2 em cada cidade, acredita-se que esta diferença está baseada neste parâmetro, pois de acordo com Pauletti et al.[18], este é um dos fatores determinantes para medida de profundidade de carbonatação.

De acordo com Teixeira et al.[15], quanto maior a quantidade de RBRO maior a taxa

de absorção por imersão e por capilaridadade, que são indícios de maiores facilidades de penetração de agentes agressivos no interior do concreto. Este fator pode explicar as maiores profundidades de carbonatação, tanto médias quanto absolutas para as duas cidades, para maiores valores de substituição do aglomerante pelo RBRO. Entretanto, um ponto positivo observado para os resultados na cidade de Rio Grande, é que o traço 0% RBRO (referência) foi o que apresentou maior profundidade de carbonatação, ou seja, o resíduo provocou uma redução da penetração do agente agressivo.

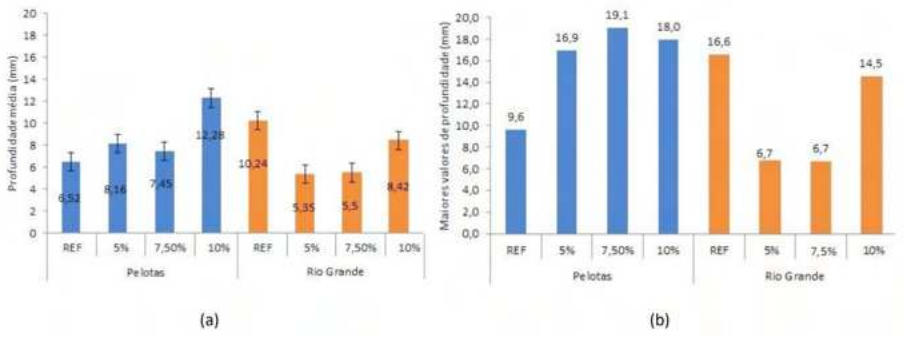


Figura 4 – Profundidades médias de carbonatação (a) e maiores profundidades de carbonatação (b)

Fonte: Autores

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de aproveitar as propriedades do RBRO, para aplicação em concretos estruturais, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar o desempenho de concretos com substituição parcial do cimento pelo RBRO frente ao processo de carbonatação natural em diferentes cidades. Como principais conclusões, mostrou-se que a diferença dos ambientes das duas cidades influenciou na frente de carbonatação, com a cidade de Rio Grande tendo apresentado as menores médias de penetração do CO_2 no concreto. Ademais, que as substituições parciais do cimento Portland por RBRO também influenciaram a entrada e propagação do dióxido de carbono, apresentando as maiores médias de profundidades atingidas os corpos de prova com maior substituição do cimento, influenciando, assim, a vida útil das estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS

1. NEGREDO, A. S. **Durabilidade de concretos com resíduo de marmoraria sob a ação combinada de carbonatação e cloretos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

2. LEEMANN A.; LOSER, R. Carbonation resistance of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 335-341, 2019.

3. TIMOSHIN A.S.; AIKI, T. Extreme solutions in control of moisture transport in concrete carbonation. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v. 47, p. 446-459, 2019.

4. GHORBANI, S.; TAJI, I.; TAVAKKOLIZADEH, M.; DAVODI, A.; BRITO, J. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 110-119, 2018.

5. ASHISH, D. K. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. **Journal of Building Engineering**, v. 15, p. 236-242, 2018.

6. KHODABAKHSHIAN, A.; BRITO, J.; GHALEHNOVI, M.; ASADI S. Mechanical, environmental, and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 237-251, 2018.

7. SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 471-488, 2017.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicas – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Agregado miúdo - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

12. HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

14. BUILD, NT. 492, Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordtest method. 1999.

15. TEIXEIRA, F. R.; MAGALHÃES, F. C.; WALLY, G. B.; SELL JUNIOR, F. K.; PALIGA, C. M.; TORRES, A. S. Use of ornamental rock waste as a partial substitute for binder in the production of structural concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 3, p. 501–514, 2020.

16. BARY, B.; SELLIER, A. Coupled Moisture-Carbon Dioxide-Calcium Transfer Model for Carbonation of Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1859-1872, 2004.

17. THIERY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. Investigation of the Carbonation Front Shape on Cementitious Meterials: effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1047-1058, 2007.

18. PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.



INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO ARGILITO NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081112

SILVA; THAÍS[1]; BERSCH; JÉSSICA[1]; ANDRADE NETO; JOSÉ[1]; MASUERO; ANGELA[1]; DAL MOLIN; DENISE[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: THAISDOSOCORRO9@GMAIL.COM

RESUMO: Este artigo avalia a influência do argilito nas propriedades reológicas de matrizes cimentícias. O argilito foi calcinado durante 60 minutos a 750°C, peneirado em malha de 0,6 mm e moído durante 3 e 6 minutos em moinho de disco. Realizaram-se ensaios de reometria rotacional em pastas de cimento Portland CP-V ARI com relação água/cimento de 0,5, com substituição em massa de 0%, 5%, 10% e 20% do cimento pelo resíduo. A diminuição da granulometria e o aumento do teor de substituição do argilito ocasionou aumento na tensão de escoamento, na viscosidade das pastas e diminuição da trabalhabilidade.

PALAVRAS-CHAVES: Argilito; pozolana; reologia; granulometria; pasta.

ABSTRACT: This paper evaluates the influence of coal mining waste on the rheological properties of cementitious matrices. The coal mining waste was calcined for 60 minutes at 750°C, sieved in 0.6 mm mesh, and milled for 3 and 6 minutes in a disc mill. Rotational rheometry tests were performed on pastes of Portland cement CP-V ARI with water/cement ratio of 0.5, with substitution in mass of 0%, 5%, 10% and 20% of cement by the waste. The decrease in particle size and the increase in the substitution content of coal mining waste caused an increase in yield stress, viscosity of pastes, and decreased workability.

KEYWORDS: Coal mining waste; pozzolan; rheology; granulometry; paste.

1 | INTRODUÇÃO

O cimento Portland, material com maior produção em massa no mundo, é o principal responsável pelo consumo de matérias-primas e de recursos naturais, além de causar a emissão de grandes quantidades de CO_2, totalizando aproximadamente 8% das emissões antropogênicas (CHATHAM HOUSE, 2018(1)). A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCSs) na sua produção é importante para a mitigação desses efeitos negativos, possibilitando reduzir o teor de clínquer, principal responsável pelos impactos ambientais. Contudo, os MCSs comumente utilizados, como a cinza volante e a escória de alto forno, além de serem encontrados em apenas algumas regiões do Brasil, apresentam quantidades limitadas, e a maior parte já é consumida pela indústria de cimento. As argilas calcinadas, amplamente disponíveis, são materiais promissores para suprir essa demanda (SCRIVENER et al., 2018(2)).

As argilas calcinadas podem apresentar atividade pozolânica, incrementando propriedades de materiais cimentícios, como a resistência à compressão. Esse crescimento deve-se, em especial, à presença de caulinita que, quando calcinada, transforma-se em metacaulinita (FERNANDEZ et al., 2011[3]). Avet e Scrivener (2018)[4] explicam que a utilização de metacaulim puro não é interessante economicamente, pois seu custo é três vezes superior ao do cimento Portland. Assim, as argilas calcinadas com teores mais baixos de caulinita são uma alternativa.

O argilito é um resíduo argiloso do processo de extração do carvão mineral e representa cerca de 20% de sua produção (PACHECO, 2008[5]; CRM, 2018[6]). No Brasil, a produção de carvão em 2018 foi de 1,2 milhões de toneladas, e no mundo, de 3,90 bilhões de toneladas (BP, 2019[7]). Considerando-se os mesmos 20% da produção de carvão como argilito, 240 mil toneladas e 780 milhões de toneladas de resíduo seriam produzidos, respectivamente, no Brasil e no mundo; os 20%, no entanto, podem variar conforme a mina e a forma de extração do carvão.

Na região de Candiota (Rio Grande do Sul - RS), a mineração de carvão mineral ocorre a céu aberto. Há dois bancos de carvão com cerca de 2m de espessura intercalados por uma camada de 80 cm de argilito. Esse resíduo é comumente destinado a aterros (PACHECO, 2008[5]; CRM, 2018[6]; MALACARNE, 2019[8]). Buscando contribuir para o estudo de MCSs, este trabalho avalia a influência da granulometria de um argilito gerado no RS e submetido a diferentes tempos de moagem nas propriedades reológicas de matrizes cimentícias, avaliadas a partir de ensaios em pasta.

2 | MATERIAIS

O argilito, obtido de uma mina na região de Candiota, foi calcinado por 60 minutos a 750 °C, seguindo o procedimento de Malacarne (2019[8]), para transformar a caulinita em metacaulinita e, assim, tornar possível sua aplicação como adição pozolânica em matrizes cimentícias. Após a calcinação e resfriamento brusco, passou-se o argilito em uma peneira com abertura de 0,6 mm (30 mesh), denominando-o ARG0. Inicialmente, buscou-se avaliar a sua potencialidade com o menor dispêndio de energia, sem submetê-lo a processos de moagem. Contudo, devido ao efeito da finura do material na atividade pozolânica, após a calcinação, foi realizada a moagem do resíduo em moinho de disco com dois tempos diferentes (3 e 6 minutos, denominados ARG3 e ARG6, respectivamente). Os diâmetros médios obtidos para o ARG0, ARG3 e ARG6, com granulometria a laser, são 20,45 µm, 15,08 µm e 8,91 µm, respectivamente.

A caracterização química do resíduo *in natura* foi realizada com o ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), apresentada na tabela 1. A soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro supera 70%, o teor de álcalis equivalente é inferior a 1,5% e o teor de sulfatos é inferior a 4%. A perda ao fogo é menor do que 10%. Assim, o argilito *in natura* atende aos requisitos químicos para se classificar como um material com atividade pozolânica, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014[9]). No FRX, não foram identificados cloretos e zinco, nem metais pesados.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	CaO	SO_3	MgO	ZrO_2	PF
57,39	24,29	4,26	2,14	1,16	1,12	0,61	0,25	0,02	8,75

Tabela 1 - Composição química do resíduo argilito *in natura*, obtida através do ensaio de FRX

Fonte: MALACARNE, 2019[8]

O ensaio de difração de raios-X (DRX), mostrado pela figura 1, identificou que o material *in natura* é predominantemente cristalino, com picos de caulinita bem evidentes. Após a calcinação do material é possível observar que não houve aumentos expressivos na amorficidade do material, contudo os picos de caulinita sofreram a desidroxilação e não foram mais verificados. Sendo assim, é provável que a caulinita tenha se transformado em metacaulinita (BERNAL et al., 2017[10]). Os teores de caulinita no argilito in natura e após a calcinação foram determinados por Malacarne (2019)[8], que observou teores de 47,11% e de 0,84%, respectivamente, indicando que aproximadamente 98% da caulinita original foi decomposta em, possivelmente, metacaulinita. No presente estudo, utilizou-se cimento Portland CP V ARI com massa específica 3,13 ± 0,02 g/cm^3, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017[11]). O diâmetro médio do material, obtido através de granulometria a laser, é de 11,04 µm.

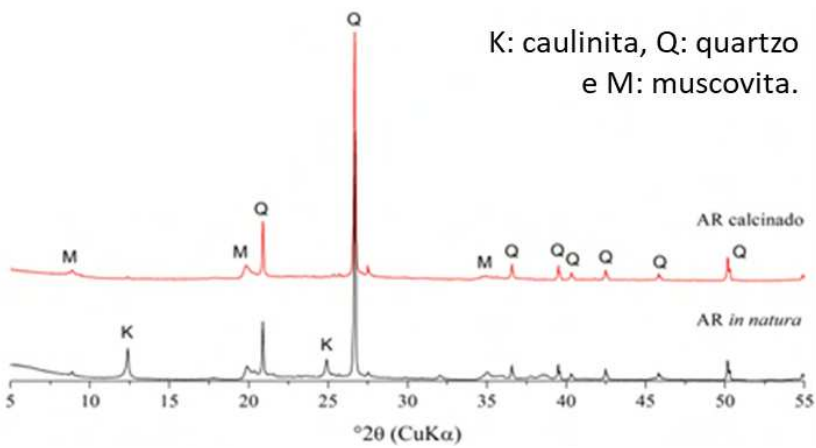


Figura 1 – Difratograma de Raio X do resíduo *in natura* e após a calcinação

Fonte: MALACARNE, 2019[8]

3 | MÉTODOS

A influência do argilito nas propriedades reológicas das matrizes cimentícias foi avaliada a partir da substituição em massa do cimento em teores de 5%, 10% e 20%. Além disso, foram executados ensaios de referência, com 0% de substituição. A mistura das pastas foi realizada com relação água/aglomerante 0,50 em um misturador vertical da marca Makita. O procedimento de mistura adotado é descrito a seguir:

a) colocar a água no cimento + argilito, previamente misturados e dispostos no recipiente de mistura;

b) misturar manualmente com o auxílio de uma haste metálica durante 30 segundos;

c) acoplar o recipiente ao misturador em 20 segundos;

d) ligar o misturador na velocidade de 10.000 rpm e misturar durante 70 segundos.

O comportamento reológico das pastas de cimento com diferentes teores de argilito foi avaliado por meio de um reômetro rotacional Brookfield R/S Plus, com cilindro cônico. Foram seguidas as recomendações da ASTM C1749-17a[12]; as pastas foram colocadas no reômetro após 2 minutos do fim da mistura (4 minutos após o contato com a água).

A figura 2 apresenta a configuração de ensaio adotada, em que a taxa de cisalhamento começa em 0,129 s^{-1} e aumenta em escala logarítmica até alcançar 50 s^{-1} e, então, decresce na mesma taxa, conforme os estudos de Vance et al. (2013)[13] e Malacarne (2019)[8]. Os parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade plástica) foram obtidos por meio da aplicação do modelo Herschel-Bulkley na segunda curva de desaceleração.

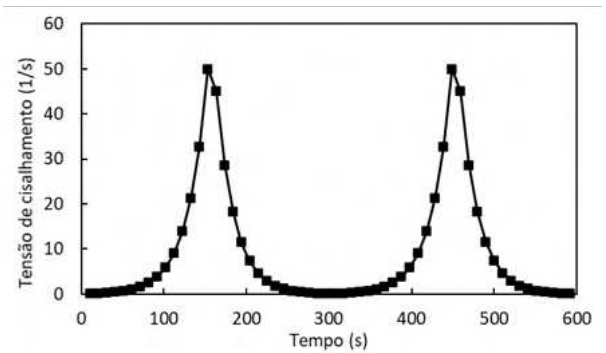


Figura 2 – Procedimento de ensaio de reometria com base na frequência de rotação em função do tempo

Fonte: Autores, 2021

4 | RESULTADOS

A figura 3 apresenta as curvas tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento das pastas com diferentes teores de argilito e com as diferentes granulometrias, ARG0, ARG3 e ARG6 respectivamente. É possível observar que a granulometria do argilito influencia na reologia da pasta. Quanto maior o teor de substituição do cimento por argilito, menores as tensões de cisalhamento observadas com o ARG0. Contudo, ao moer o resíduo, observou-se o comportamento inverso da pasta, em que o aumento da

substituição de cimento ocasionou o aumento da tensão de cisalhamento das pastas. Em relação à reologia, portanto, a utilização do ARG0 apresentou melhor comportamento, porém, sua reatividade pozolânica é possivelmente inferior à do ARG3 e ARG6 devido ao maior diâmetro de suas partículas.

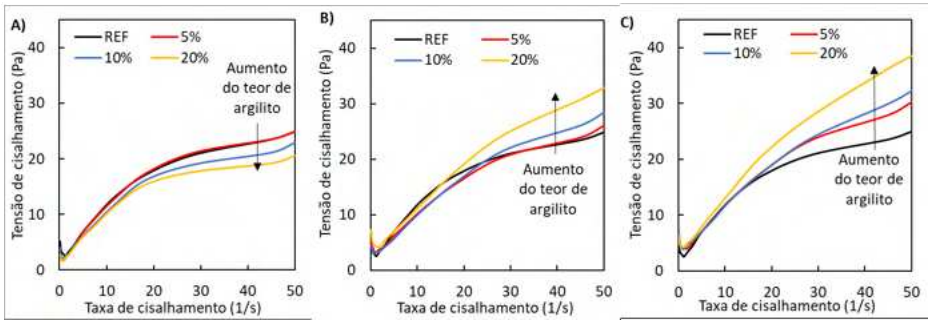


Figura 3 – Curva de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento para as pastas: a) com ARG0; b) com ARG3 e c) com ARG6

Fonte: Autores, 2021

Em geral, como observado para o ARG3 e o ARG6, ao se substituir o cimento por argilas calcinadas, observa-se uma grande redução de fluidez devido à elevada área superficial das argilas e, por conseguinte, à maior demanda de água (LI e DING, 2003[14]; SHANAHAN et al., 2016[15]). Com o argilito ARG0 se observa o oposto, possivelmente devido à granulometria mais grossa, sendo as partículas maiores que as do cimento e, assim, possivelmente apresentando área superficial menor. Com isso, tem-se uma redução de finos na mistura e consequentemente da superfície disponível para adsorção da água, o que gera um aumento de fluidez e redução das tensões de cisalhamento.

A figura 4 apresenta os resultados de viscosidade, tensão de escoamento e índice de comportamento das pastas para ARG0, ARG3 e ARG6 e os diferentes teores de substituição. Analisando o índice de comportamento “n” , representado na figura 4-c, é possível observar que todas as pastas apresentaram comportamento pseudoplástico. Sendo assim, sua viscosidade reduz com o aumento da taxa de cisalhamento. Contudo, em geral, a moagem do resíduo favoreceu o comportamento dilatante, devido ao maior fator de empacotamento nas pastas, como observado por Andrade Neto *et al.* (2021)[16].

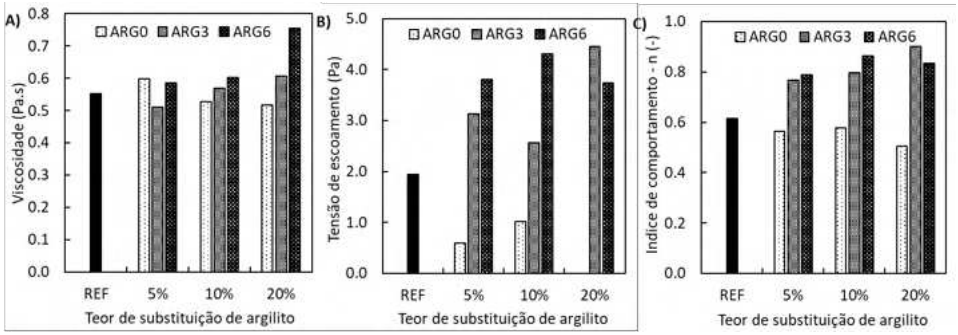


Figura 4 – Parâmetros reológicos das misturas com ARG0, ARG3 e ARG6 e diferentes teores de substituição: a) viscosidade; b) tensão de escoamento e c) índice de comportamento

Fonte: Autores, 2021

A tensão de escoamento da mistura com substituição de 20% de ARG0 foi de 0 Pa, de acordo com o modelo Herschel-Bulkley, porém não é essa a tensão de escoamento "real" da mistura, visto que esse modelo tende a dar valores desse parâmetro mais baixos que outros modelos. Ademais, é possível observar que os resultados de viscosidade corroboram o observado nas curvas de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento (figura 3). A granulometria do argilito é o que mais impacta a viscosidade das pastas avaliadas, indicando que quanto menor o diâmetro da partícula do resíduo, maior a viscosidade das misturas quando realizada a substituição de cimento.

Em relação aos teores de substituição, o ARG3 e ARG6 causaram aumento da viscosidade e da tensão de escoamento das misturas, devido ao aumento de partículas finas das pastas. Contudo, o ARG0 provocou a diminuição da viscosidade com o aumento do teor de substituição, devido ao diâmetro de suas partículas serem superiores ao do cimento, reduzindo a superfície disponível para a adsorção de água nas partículas, gerando um aumento de água livre e disponível para lubrificar as partículas, promovendo a fluidez, como identificado anteriormente.

5 | CONCLUSÃO

A granulometria das partículas de argilito influencia no comportamento reológico das misturas cimentícias, aumentando a viscosidade e a tensão de escoamento ao aumentar a finura do material. O mesmo comportamento é observado quando aumenta-se o teor de substituição das misturas realizadas com ARG3 e ARG6, que sofreram o processo de moagem, tornando suas partículas mais finas em relação às de cimento. As pastas com ARG0, que não foi beneficiado no moinho de discos, apresentaram o comportamento inverso, apresentando diminuição da viscosidade e da tensão de escoamento e diminuição da taxa de cisalhamento, quando comparadas com a referência, indicando que seu diâmetro é maior que o dos grãos de cimento. Do ponto de vista econômico, a utilização do resíduo sem moer, ARG0, é mais interessante pois não prejudica o comportamento reológico das misturas; contudo, devido ao maior tamanho de seus grãos, deve-se realizar a verificação de sua reatividade pozolânica em comparação ao ARG3 e ARG6.

REFERÊNCIAS

1. CHATAM HOUSE. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. **CHATAM HOUSE Report**, 2018. Disponível em: <https://reader.chathamhouse.org/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete#>. Acesso em: 22 de setembro de 2019.

2. SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 113, 2018, p. 2-26.

3. FERNANDEZ, R.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, ilite and montmorillonite. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 1, 2011, p. 113-122.

4. AVET, F.; SCRIVENER, K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC^3). **Cement and Concrete Research**, v. 107, 2018, p. 124-135.

5. PACHECO, E. T. **Estudo do beneficiamento a seco do carvão da mina de Candiota – RS.** 2008. 78 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

6. CRM. COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **Balanço 2018.** Porto Alegre: CRM, 2018. 3 p.

7. BP. **BP Statistical Review of World Energy**. 68th edition, 2019. Disponível em: < https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-coal.pdf>. Acesso em: 08 out. 2019.

8. MALACARNE, C. S. Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC^3 - cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário - a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul. 2019. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019.

9. ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

10. BERNAL, S. A.; JUENGER, M. C. G.; KE, X.; MATTHES, W.; LOTHENBACH, B.; DE BELIE, N.; PROVIS, J. L. Characterization of supplementary cementitious materials by thermal analysis. **Materials and Structures**, v. 50, p. 1-13, 2017.

11. ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

12. ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1749 – 17a**: Standard Guide for Measurement of the Rheological Properties of Hydraulic Cementitious Paste Using a Rotational Rheometer. Pennsylvania, 2017.

13. VANCE, K.; KUMAR, A.; SANT, G.; NEITHALATH, N. The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 196-207, 2013.

14. LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, 2003, p. 579-584.

15. SHANAHAN, N.; TRAN, V.; WILLIAMS, A.; ZAYED, A. Effect of SCM combinations on paste rheology and its relationship to particle characteristics of the mixture. **Construction and Building Materials**, v. 123, 2016, p. 745-753.

16. ANDRADE NETO, J. S.; SANTOS, T. S.; PINTO, S. A.; DIAS, C. M. R.; RIBEIRO, D. V. Effect of the combined use of carbon nanotubes (CNT) and metakaolin on the properties of cementitious matrices. **Construction and Building Materials**. v. 271, p. 1-15, fev. 2021.

EFEITO DA ADIÇÃO DE CINZA DE OLARIA NO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA DE SOLO ARGILOSO DA REGIÃO DE GUARAPUAVA-PR

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081113

KADLOBICKI; LUCAS[1]; TRENTO; VANDERLEI[2]; PAULINO; RAFAELLA SALVADOR[3]; DA SILVA; SAUANA CENTENARO[4]
[1234]FACULDADE GUARAPUAVA
RAFAELLASPAULINO@GMAIL.COM

RESUMO: Em épocas de plantio e colheita, o tráfego em estradas rurais se torna intenso, provocando a deterioração das mesmas. Este trabalho teve como objetivo analisar o efeito do uso da cinza de olaria (CO) nas propriedades geotécnicas básicas do solo argiloso da região de Guarapuava-PR. A CO foi dividida em três composições granulométricas (>300µm, > 150µm e ≤ 150 µm) e para cada uma delas, foram produzidas misturas com os teores substituição do solo de 25, 50 e 75%, em massa. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, compactação e ISC. A adição de CO conferiu melhorias nas propriedades geotécnicas do solo, principalmente quando utilizada a granulometria de 300µm, com um teor de substituição de 50%.

PALAVRAS-CHAVES: ENARC2021, adição mineral, estabilização de solos, resíduos, pavimentação.

ABSTRACT: During planting and harvesting seasons, traffic on rural roads becomes intense, causing them to deteriorate. This work aimed to analyze the effect of using pottery ash (CO) on the basic geotechnical properties of clayey soil in the region of Guarapuava-PR. The CO was divided into three granulometric compositions (>300µm, > 150µm and ≤ 150 µm) and for each of them, mixtures were produced with soil replacement contents of 25, 50 and 75%, by mass. Geotechnical characterization, compaction and ISC tests were carried out. The addition of CO provided improvements in the geotechnical properties of the soil, especially when using a particle size of 300µm, with a 50% replacement content.

KEYWORDS: ENARC2021, mineral addition, soil stabilization, waste, paving.

1 | INTRODUÇÃO

Rodovias não pavimentadas e de má qualidade trazem grandes problemas à população, principalmente às dependentes, uma vez que influencia no aumento do valor de fretes, pode ocasionar problemas de circulação, dificultando o acesso à atendimento de saúde, à educação, ao comércio e demais necessidades básicas, assim como para o escoamento da produção agrícola e agropecuária (SOLIZ, 2007)(1). Em épocas de plantio e colheita, o tráfego em estradas rurais se torna mais intenso e o grande fluxo de veículos pesado pode comprometer a qualidade dos pavimentos, ocasionando a deterioração dos mesmos. Em épocas chuvosas, o tráfego impulsiona a formação de buracos e valetas e em períodos de seca, colabora para o surgimento de

problemas relacionados ao ressecamento do solo e geração de poeira.

Desse modo, esse cenário requer atenção, em especial, na construção das subcamadas dos pavimentos, visto que tecnicamente desejam-se materiais que apresentem boa resistência e baixa deformidade, propriedades encontradas, em geral, em solos granulares (FROTA; MELO; NUNES, 2006)[2]. Por outro lado, quando o solo não evidencia os parâmetros geotécnicos prescritos em normas, há a necessidade de estabilizá-lo por processos químicos ou granulométricos, ou seja, misturá-los a aditivos ou a materiais, a fim de melhorar suas propriedades, como a resistência mecânica (DE CASTRO *et al.,* 2019)[3].

Diversos estudos a respeito de solos estabilizados granulometricamente com o uso de materiais moídos em alta energia tem sido realizados nos últimos anos. Bahmani *et al.* (2014)[4] verificaram, em seu trabalho, um aumento significativo na resistência à compressão dos solos pela inserção de sílica moída a uma argila de alta plasticidade. Huan-Lin *et al.* (2012)[5] registraram um acréscimo de resistência na mistura de uma argila de baixa plasticidade com alumina, conforme os ensaios de RCS (resistência à compressão simples) e CBR (Índice de Suporte Califórnia).

Nas olarias são fabricadas peças como tijolos, manilhas, telhas ou louças. Dentre as etapas de produção, tem-se a queima das peças dentro de fornos abastecidos normalmente por madeira, cavaco ou serragem, que geram as cinzas como resíduos, diariamente, destinadas ao aterro sanitário ou muitas vezes, devido ao grande volume produzido e alto custo de transporte, de forma irregular, prejudicando o meio ambiente (SILVA *et. al,* 2020)[6]. Sendo assim, com a finalidade de melhorar as propriedades dos pavimentos de estradas não pavimentadas e aliado à vertente sustentável, de reutilização de resíduos, este trabalho propõe analisar o efeito do uso da cinza de olaria (CO) proveniente da queima dos tijolos nas propriedades geotécnicas básicas do solo argiloso de estradas rurais da região de Guarapuava-PR.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste trabalho foi utilizado o solo classificado por Michalowicz (2012)[7] como solo do tipo Latossolo Bruno Distrófico, muito argiloso. A cinza (Figura 1) utilizada se deu pela queima da serragem em mistura com resíduos do tijolo, feita com temperatura não controlada. Foi fornecida pela Cerâmica Rolim LTDA ME, localizada na região de Prudentópolis-PR.



Figura 1 – Cinza de olaria (a); forno da olaria (b).

2.2 Métodos

A metodologia deste trabalho subdivide-se em atividades relativas à preparação do solo, à produção da CO e aos procedimentos de preparação e caracterização das misturas solo-CO.

2.2.1 Procedimentos aplicados ao solo

A preparação do solo para os ensaios de caracterização e de compactação se deu conforme as recomendações da ABNT NBR 6457:2016[8]. Após coleta na jazida de empréstimo, o solo foi peneirado, espalhado, e exposto sobre uma lona plástica para secagem ao ar, buscando o equilíbrio higroscópico com o meio. Foram retiradas amostras do solo de modo a serem utilizadas no ensaio para determinação da umidade higroscópica, servindo-se de estufa mantida à temperatura de 105 °C. Uma vez preparado, o solo foi acondicionado em sacos plásticos até o momento de ser utilizado nos ensaios de laboratório.

Com as amostras de solo puro foi realizada a caracterização geotécnica: ensaio para determinação da massa específica dos sólidos (ABNT NBR 6508:2017)[10]; ensaio de análise granulométrica (ABNT NBR 7181:2018)[12]; ensaios de Limites de Atterberg para determinação dos limites de liquidez (ABNT NBR 6459:2017)[9] e de plasticidade (ABNT NBR 7180:2016)[11]. Prosseguindo-se, com as amostras de solo puro foram realizados os ensaios de compactação, de acordo com a norma ABNT NBR 7182:2020[13], para se obter os valores de teor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do solo, além do ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC), realizado seguindo as prescrições da norma do DNIT 172/2016 – ME[15], para a obtenção dos valores de ISC e expansão do solo.

2.2.2 Procedimentos para preparo da cinza de olaria (CO)

Após a coleta, as cinzas foram submetidas ao peneiramento, de acordo com as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003[14]. Foram utilizados como material desse estudo as cinzas retidas na peneira de 300 µm (C1), retidas na peneira 150 µm (C2) e a

passantes na peneira 150 µm (C3).

2.2.3 Procedimentos aplicados às misturas solo-CO

As porcentagens de cinzas incorporadas à mistura solo-CO foram de 25, 50 e 75%, para cada uma das três classes granulométricas, com vista a obter diferentes níveis de respostas frente à ação da cinza. Realizou-se a caracterização geotécnica das misturas de solo-CO de forma análoga ao solo puro, por meio da execução dos ensaios de determinação do LL (ABNT NBR 6459:2017)[9], LP (ABNT NBR 7180:2016)[11] e de compactação (ABNT NBR 7182:2020)[13]. Com os resultados obtidos nos ensaios de compactação, foram moldados corpos de prova, nas condições consideradas ótimas, com as misturas de solo-CO, para cada teor de substituição. Nas misturas, adotou-se o processo de mistura mecânico, utilizando-se betoneira de eixo inclinado. Adicionou-se primeiramente a CO ao solo, e em seguida, adicionou-se água às misturas, realizando-se a homogeneização das mesmas (Figura 2).



Figura 2 – Solo e cinza antes da mistura (a); processo de mistura em betoneira(b); CPs moldados (c).

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC), realizado seguindo as prescrições da norma do DNIT 172/2016 – ME[15], para a obtenção dos valores de ISC e expansão das misturas. Cabe mencionar que para se realizar esse tipo de ensaio, tanto após a moldagem quanto após a cura de sete dias em câmara úmida, as amostras ficaram imersas em água durante quatro dias, visando-se avaliar suas propriedades expansivas.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Ensaios de caracterização física e mineralógica

Na Tabela 1 são apresentados os valores obtidos para os limites de Atterberg.

Características		Solo	C1			C2			C3		
			C1-25	C1-50	C1-75	C2-25	C2-50	C2-75	C3-25	C3-50	C3-75
Limites de Atterberg	LL (%)	50,4	56,44	57,36	-	45,88	44,58	35,83	46,88	43,38	42,86
	LP (%)	44,12	48,41	50,34	-	41,9	39,67	31,07	40,53	34,55	38,53
	IP (%)	6,28	8,03	7,02	-	3,98	4,91	4,76	6,35	8,83	4,33

Tabela 1 – Caracterização e classificação geotécnica do solo e das misturas.

Percebe-se que a incorporação de cinza no solo diminui os limites de Atterberg, com exceção de C1 o qual aumenta estes a ponto de que com 75% da substituição não se fosse possível analisar, isso porque não foi possível chegar a uma quantidade de água ideal para que houvesse a coesão entre as partículas, segundo a NBR 7180:2016 essa mistura de C1 com 75% de substituição é não plástico (NP). Para as outras granulometrias C2 e C3, quanto maior a porcentagem de incorporação maior a alteração desses parâmetros, devido ao fato de a partícula da cinza ser porosa o que faz com que ela própria absorva mais água, tornando assim a mistura menos fluida, fazendo que a mistura passe do estado líquido para o plástico com um menor teor de umidade.

3.2 Ensaios geotécnico e mecânico

Foram realizados também os ensaios de ISC com o solo puro e, em seguida, com o solo contendo a adição da cinza nos percentuais estabelecidos. Os resultados obtidos estão ilustrados no gráfico da Figura 3.

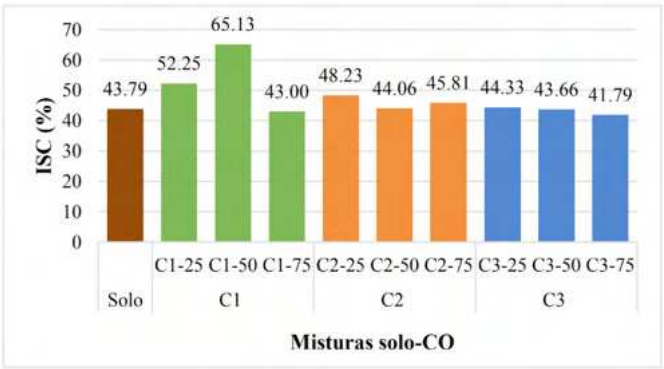


Figura 3 – Valores do ISC obtidos para o solo puro e para as misturas solo-CO.

Observa-se que o solo obteve um ISC de 43,79%, esse índice foi obtido para ser um valor de referência, o qual foi comparado com os demais valores obtidos nessa tabela. O maior índice de ISC da mistura solo-CO obtido foi de 65,13% com a cinza da peneira 300µm e substituição de 50%, assim como o menor ISC foi de 41,78% com a peneira passante da cinza 150µm e substituição de 75%. Assim, obteve-se como resultado principal deste trabalho que a cinza na granulometria 300µm e teor de substituição 50% é o ideal para ser utilizado. Essa porcentagem de ISC é a relação entre a penetração do corpo de prova moldado e a resistência de um corpo de prova de uma pedra britada padronizada 100%, ou seja, o melhor resultado obtido da mistura foi referente a 65,13% de resistência de uma pedra britada.

Porém, a maioria dos outros valores obtidos, exceto os teores 75% da peneira 300 µm, 50% e 75% da passante na peneira 150µm, obtiveram valores de ISC maiores do que do solo, isso significa que as misturas possuem resistência a penetração maior que a do solo e podem também serem utilizadas para a estabilização do mesmo, sendo uma boa alternativa para a estabilização das estradas rurais.

Sugere-se também que esta mesma mistura possa ser utilizada como sub base de pavimentação, conforme especificação técnica do departamento de estradas e rodagem (2006) para base e sub bases estabilizados com cal, o material poder ser utilizado para base se o ISC for maior ou igual a 60%, possuir expansão menor ou igual a 0,5% e possuir uma granulometria de no mínimo 60% passante na peneira 2,0mm, isso para solo argiloso. Já para sub-base, a expansão deve ser menor ou igual a 1,0% e ISC maior ou igual 30%. Dessa forma, os resultados da cinza da granulometria 300µm e teor de substituição 50% atende os requisitos para ser utilizado como sub-base de pavimentação.

A Figura 4 apresenta os valores de expansão obtidos no ensaio tanto para o solo como para as misturas solo-CO em todas as suas porcentagens.

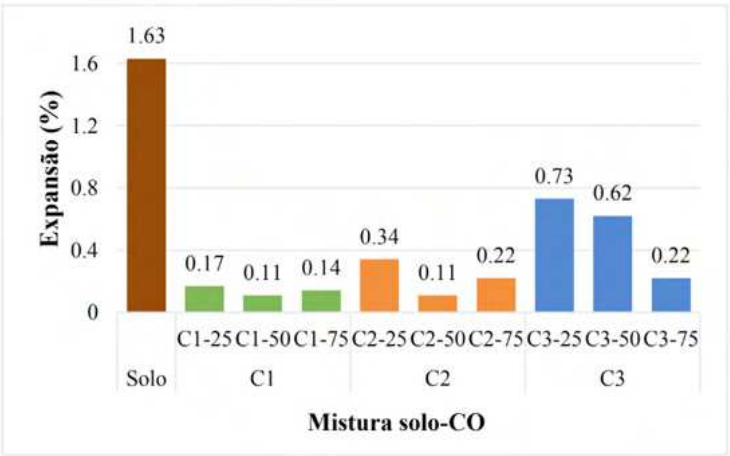


Figura 4 – Valores de expansão obtidos para o solo puro e para as misturas solo-CO.

Pode-se observar que o solo possui expansibilidade elevada (1,63%) se comparado com as misturas solo-CO. Sabe-se que os valores de expansão para materiais utilizados como base e sub-base devem ser inferiores a 0,5% e 1% respectivamente, assim todas as misturas de solo-CO para as C1, C2, e C3 se enquadram nas especificações de sub-base (menor de 0,5%), e além disso para a especificação de base, as misturas solo-CO para C1 e C2 bem como C3-75 se enquadram, sendo que o solo sem nenhuma adição não se enquadra em nenhuma das especificações citadas.

4 | CONCLUSÕES

Concluiu-se que o melhor teor de substituição de 50% da cinza de granulometria 300µm, visto que apresentou o melhor resultado de ISC, em comparação com o solo, de aproximadamente 22% acima do valor de referência. Sugere-se que esta mesma mistura possa ser utilizada também como sub base de pavimentação, já que o mínimo exigido para tal é de 20% de ISC, índice de plasticidade menor que 6% e expansão menor ou igual a 1%, enquadrando-se a mistura mencionada em todos os aspectos exigidos pela norma. Portanto, a mistura solo-CO demonstrou grande potencial para estabilização do solo, contribuindo para a destinação correta de cinzas de olarias.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade Guarapuava, pela estrutura de laboratórios disponibilizada e ao técnico do laboratório, Neilor, que sempre esteve disposto a nos ajudar. À Cerâmica Rolim LTDA.ME que nos disponibilizou a cinza, matéria-prima deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. SOLIZ, V.V.P., **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**, Dissertação de MSc., UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

2. FROTA, C. A., MELO, D. M., NUNES, F. R. G., Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduo Processado da Construção Civil, **In: V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias**, Andit, p.15, Recife-PE, Jul. 2006.

3. DE CASTRO, C. E. N.; DA SILVA, R. R. F.; SANTOS, L. F.; MENDES, A. S.; LIMA, C. A. DE P.; DA FROTA, C. A. Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. **Revista Matéria**, n. 2, V 24. 2019.

4. BAHMANI, S. H., HUAT, B. B. K., ASADI, A., et al., Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement, **Construction and Building Materials**, v. 64, pp. 350-359, Ago. 2014.

5. HUAN-LIN L., HSIAO D., LIN D., LIN C., Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide, **International Journal of Transportation Science and Technology**, v.1, n. 1, Mar.2012.

6. SILVA, L. H. P.; TAMASHIRO, J. R.; ANTUNES, P. A.; PEREIRA, D. R. Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. **Revista Matéria**, n. 1, V 25. 2020.

7. MICHALOWICZ, L. **Atributos químicos do solo e resposta da sucessão milho -cevada-feijão trigo influenciados por doses e parcelamento de gesso em Plantio Direto**. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação de Agronomia) – UNICENTRO, Guarapuava, 2012.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

9. _____. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

10. _____. NBR 6508: 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, 2017.

11. _____. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

12. _____. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

13. _____. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação, Rio de Janeiro, 2020.

14. _____. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

15. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 172/2016-ME**. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.



CAPÍTULO 14

ANÁLISE CRÍTICA DOS MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) BASEADA EM CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DE CONCRETOS RECICLADOS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081114

FERREIRA; GUILHERME DE ANDRADES[1]; NEUMANN; ISADORA SAMPAIO[1]; SANTOS; IAGO LOPES[1]; DAL MOLIN; DENISE CARPENA COITINHO[1];
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ANDRADESFERREIRA.GUILHERME@GMAIL.COM

RESUMO: O Resíduo de Construção e Demolição pode ser reaproveitado na construção civil como agregado reciclado. Entretanto, a variabilidade do material dificulta a determinação das suas propriedades e seu uso na produção de concreto. Para obter um agregado de melhor qualidade são empregadas técnicas de beneficiamento de agregados graúdos de RCD. Assim, o objetivo do artigo é analisar métodos de separação de agregados reciclados baseado em critérios de desempenho de concretos utilizando dados de pesquisas presentes na literatura. A partir das análises, foi determinado que a separação por líquidos densos foi o método de separação de agregado reciclado graúdo mais eficaz.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduo de construção e demolição, variabilidade, técnicas de separação, agregado reciclado, concreto reciclado.

ABSTRACT: The Construction and Demolition Waste (CDW) can be reused in civil construction as recycled aggregate. However, the material's variability makes it difficult to determine its properties and its use in the production of concrete. To obtain a higher quality aggregate, processing techniques coarse CDW aggregates are used. Thus, the aim of the article is to analyze methods of separation of recycled aggregates based on concrete performance criteria using research data from the literature. From the analyses, it was determined that dense liquid separation was the most effective separation method for coarse recycled aggregate.

KEYWORDS: Construction and demolition waste, variability, separation techniques, recycled aggregate, recycled concrete.

1 | INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil impacta diretamente o meio ambiente e um dos motivos é a grande quantidade de resíduos por ela gerada. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), que traz o panorama dos resíduos sólidos no Brasil, desde 2010 houve um aumento de 34,8% na quantidade de RCD coletado pelos municípios brasileiros, chegando a 44,5 milhões de toneladas em 2019 (ABRELPE, 2020 (1)).

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), também conhecidos como Resíduos da Construção Civil (RCC), são definidos pela resolução 307 do CONAMA como todo resíduo proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de

construção civil, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, enfim, todo material comumente chamado de entulho de obras (CONAMA, 2002 [2]).

Os RCDs vêm recebendo cada vez mais atenção de pesquisadores, devido à grande quantidade desse material gerada anualmente e de seu potencial aproveitamento na própria construção civil (DOS SANTOS, 2020 [3]). Parte deste material, após beneficiado, pode ser usado como agregado graúdo reciclado, o qual pode ser empregado na produção de novos concretos, substituindo os agregados graúdos convencionais (LEITE, 2001 [4]; SAMPAIO et al. 2020 [5]).

Porém, os agregados graúdos reciclados possuem características distintas das características dos agregados graúdos convencionais, sendo a heterogeneidade e variabilidade em sua composição, características que dificultam sua inserção como agregado reciclado em concretos e, por consequência, a sua normatização para produção de novas tecnologias (CABRAL, 2007 [6]; VIEIRA E DAL MOLIN, 2004 [7]).

Buscando viabilizar o uso do agregado graúdo reciclado, estudam-se metodologias para melhorar suas características (ANGULO, 2005 [8]; SAMPAIO et. al. 2020[5]; MONDINI, 2018[9]; entre outros). Dentre as metodologias existentes, as mais encontradas em pesquisas no Brasil são as separações de agregado graúdo por densidade fazendo uso de jigue pneumático, jigue hidráulico e pelo método de líquidos densos (MALYSZ, 2018[10]; MATOS, 2020[11]; CUNHA, 2017[12]; DOS SANTOS, 2020[3]; MASUERO, 2017[13]; CARRIJO, 2005[14]).

Considerando o exposto, o trabalho se justifica em fazer uma análise crítica e revisão bibliográfica sobre as metodologias mais utilizadas no Brasil, sendo que, a partir destas análises, procurar determinar quais das principais técnicas de separação de agregado graúdo reciclado são mais viáveis para melhorar as características dos agregados e, consequentemente, as propriedades dos concretos que possuem agregados graúdos reciclados em sua composição, sem resultar em aumento demasiado do custo de produção do metro cúbico do concreto em relação ao custo de produção dos concretos convencionais.

2 | MÉTODOS DE SEPARAÇÃO

Os métodos de separação dos agregados graúdos reciclados comparados no artigo são: jigue hidráulico, jigue pneumático e separação densitária por líquidos densos.

O método de separação por líquidos densos é um processo de separação gravimétrica utilizado na separação de materiais. Baseia-se na diferença de densidade entre um meio fluido e as partículas a serem separadas, de forma que os elementos que possuem densidade inferior ao meio flutuam, e aqueles com densidade superior afundam (MASUERO, 2017[13]).

O processo de jigagem consiste na separação dos materiais por repetida expansão e contração vertical de um leito de partículas, através da movimentação da água, no caso do jigue hidráulico, ou do ar, no jigue pneumático. Gradualmente, os elementos de menor densidade concentram-se no topo, e os mais densos depositam-se no fundo (MASUERO, 2017[13]).

A jigagem a ar possui a vantagem de não utilizar água no processo, oferecendo

benefícios econômicos e ambientais, porém perde sua eficiência quando são utilizados materiais de baixa granulometria, com partículas de tamanho menor que dois milímetros (MALYSZ, 2018[10]). Já a jigagem à água apresenta maior confiabilidade, produtividade e custos reduzidos (DOS SANTOS, 2020[3]).

3 | METODOLOGIA

Para realização desse estudo foi realizado um levantamento de dados gerados a partir da utilização das técnicas citadas no item 2 aplicadas em pesquisas presentes na literatura nacional. Foram selecionados 3 métodos, os quais apresentam mais pesquisas sobre a utilização destes e dentre as pesquisas encontradas foram selecionados dois trabalhos por método, baseado na disponibilidade de dados na pesquisa, para comparação de resultados. Foram comparados indicadores como consumo de cimento/MPa e resistência à compressão. Com a comparação do consumo de cimento busca-se avaliar de maneira simplista o acréscimo de custo que o aumento do consumo de cimento representa na produção de concreto, visto que o aumento deste serve para compensar o acréscimo na quantidade de água na mistura ocasionado pelo uso de agregado reciclado (LEITE, 2001[4]). A partir destas análises, procurou-se determinar quais técnicas de separação de RCD são mais viáveis nos quesitos custo e desempenho dos concretos produzidos. Nesta análise não foram considerados os custos com a separação dos RCD.

4 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS MÉTODOS DE SEPARAÇÃO

Para o jigue a ar foram encontrados valores interessantes para consumo de cimento/MPa nos dois trabalhos analisados (MALYSZ, 2018[10] e MATOS, 2020[11]), conforme apresentado na figura 1. Apesar de ainda que jigado tanto o consumo de cimento/MPa quanto a resistência à compressão dos concretos com material reciclado dos dois trabalhos tenham sido inferiores aos números dos concretos utilizando agregado natural, os concretos com material beneficiado no jigue pneumático quando comparados aos concretos utilizando agregado reciclado não jigado resultaram em um consumo de cimento/MPa aproximadamente 9% inferior para traço 1:2,5, 15% para 1:4 e 10% para 1:5,5 no trabalho de Malysz (2018)[10]. Para Matos (2020) [11], foram obtidos valores aproximadamente 2,5%, 11,5% e 21,5% menores para os traços 1:3,5, 1:5 e 1:6,5, respectivamente, o que indica um benefício econômico na utilização do jigue pneumático para obtenção de um agregado reciclado mais denso. Por outro lado, o uso do jigue a ar não se mostrou tão eficiente quando se olha para o gráfico de resistência à compressão, por mais que os resultados em média tenham demonstrado ligeira melhora na resistência quando comparados ao material reciclado que serviu como referência. Malysz (2018) [10], ao utilizar agregados reciclados de 3 fontes diferentes, encontrou resultados inconstantes para desempenho mecânico dos concretos produzidos, mas ainda assim, a média dos resultados de resistência à compressão foi superior para o concreto com agregado reciclado que passou pelo jigue pneumático.

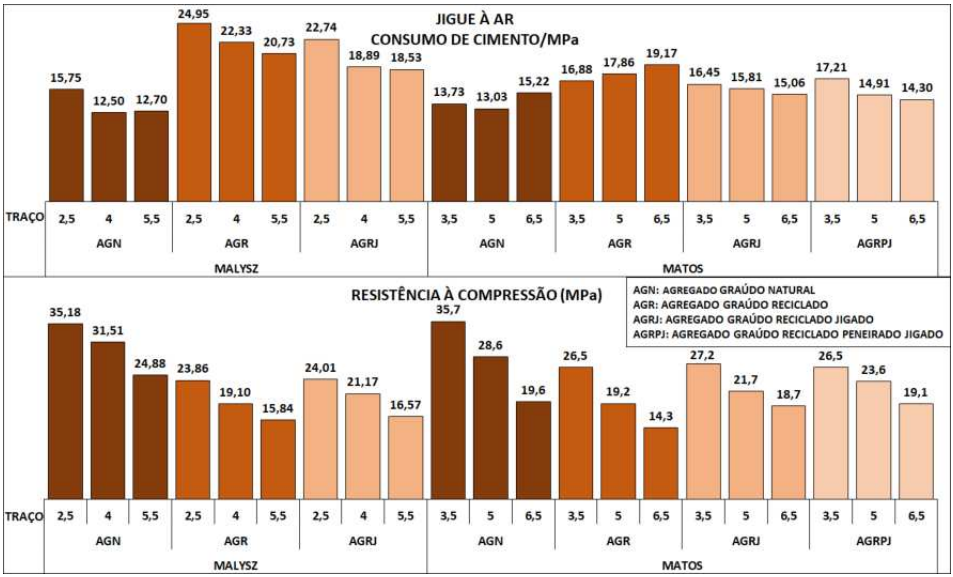


Figura 1 –Consumo de cimento/MPa e Resistência à compressão – Jigue a ar.

Fonte: Autor

A partir da Figura 2, referente ao jigue hidráulico, é notável um padrão de comportamento dos concretos, principalmente para os resultados do ensaio de resistência à compressão. Como esperado, tanto para Cunha (2017) [12] quanto para Dos Santos (2020) [3], os concretos usando agregados reciclados da gaveta de fundo do jigue (material mais denso) obtiveram melhores resultados para consumo de cimento/MPa e resistência à compressão que os concretos com agregados reciclados do meio ou topo, com exceção do consumo de cimento no traço 1:3 de Cunha (2017) [12]. Dos Santos (2020) [3], ao estudar duas rotas de beneficiamento (jigagem única e jigagem dupla), evidenciou, a partir dos seus resultados, que dois ciclos de jigagem é uma alternativa eficaz na busca por um agregado de melhor qualidade. Os resultados do material reciclado da gaveta de fundo, após jigagem dupla, mostrou comportamento muito similar ao do concreto referência usando agregado natural, enquanto seu concreto de material jigado apenas uma vez obteve resultados levemente inferiores. Para Cunha (2017) [12], o concreto usando material reciclado mais denso também se comportou de maneira similar aos de agregados naturais, com seus resultados para resistência à compressão ficando entre os concretos de agregado natural (AN) do topo e do fundo do jigue.

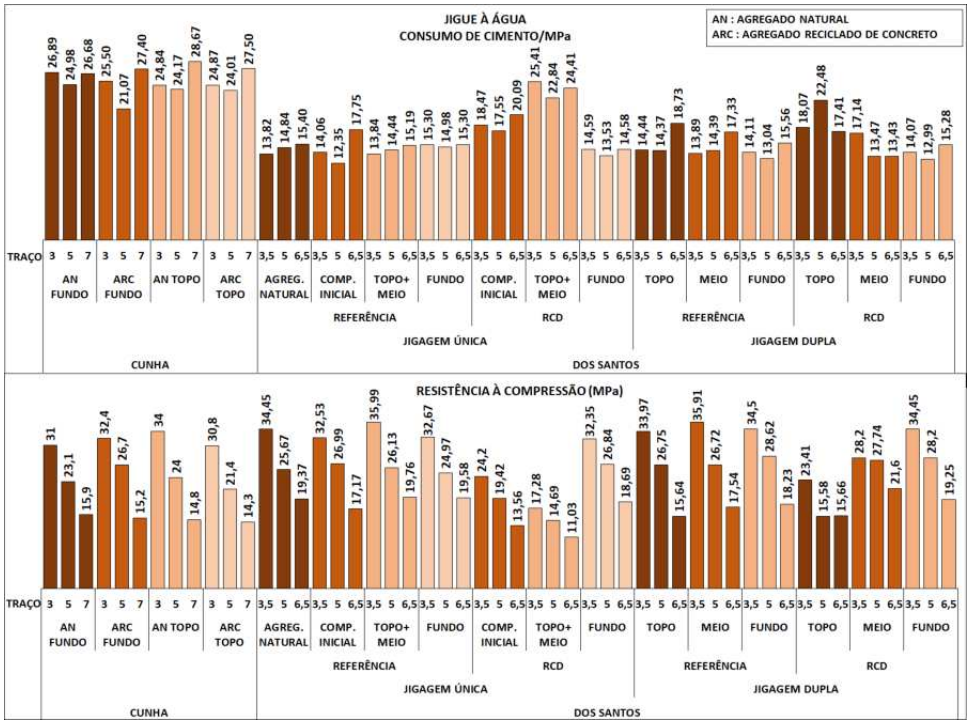


Figura 2 –Consumo de cimento/MPa e Resistência à compressão – Jigue à água.

Fonte: Autor

A figura 3 apresenta os resultados obtidos por Carrijo (2005) [14] e Masuero (2017) [13] através da separação densitária dos RCD com a utilização de líquidos densos. A separação por faixas de densidade promoveu comportamento homogêneo dos concretos para mesma faixa de densidade. Segundo os resultados dos dois autores, as frações mais densas dos agregados reciclados, quando usados na produção de concreto, foram capazes de atingir valores até melhores que os valores referência para resistência mecânica e no consumo de cimento/MPa. Para Carrijo (2005) [14], concretos com materiais cinza (predominantemente de origem cimentícia) e vermelhos (predominantemente de origem cerâmica) de densidade maior que 2,5 g/cm³ chegaram em aumentos expressivos na resistência à compressão comparando estes ao concreto de agregado natural, 81% para o cinza e 53% para o vermelho com consumo de cimento fixado em 300 kg/m³, e para consumo de 400 kg/m³ houve aumentos de 20% e 25% para os materiais de origem cimentícia e cerâmica, respectivamente. Para consumo de cimento/MPa, os resultados dos concretos usando materiais cinza e vermelho em comparação aos concretos referência foram em média 40% e 18% menores para os consumos de cimento fixados em 300 e 400 kg/m³. Masuero (2017) [13] encontrou resultados na mesma linha, os valores resultantes do ensaio de resistência à compressão para concretos usando agregados reciclados de maiores densidades (Composição de massas específicas 2,4*2,6 e 2,6 g/cm³) foram iguais ou superiores aos resultados do

concreto referência, com exceção do agregado de densidade 2,6 g/cm³ no traço 1:6,5, que foi apenas 2% menor.

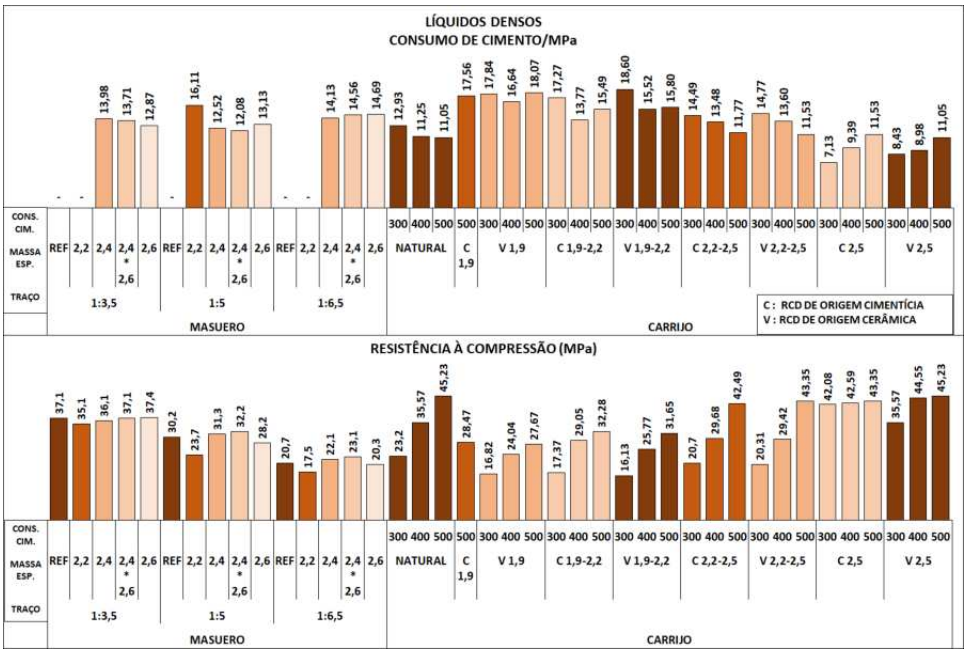


Figura 3 –Consumo de cimento/MPa e Resistência à compressão – Líquidos densos.

Fonte: Autor

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração as análises feitas neste artigo sobre os métodos de separação escolhidos para comparação, foi possível determinar a separação por líquidos densos como o método de separação de agregado reciclado mais eficaz. Os concretos com agregados mais densos produzidos por Masuero (2017) [13] e Carrijo (2005) [14], após a separação por densidade, tiveram os maiores valores no ensaio de resistência à compressão e menor consumo de cimento/MPa. Apresentando, assim, bom desempenho e, pelo indicador observado, baixo custo. Segundo Amaral Filho (2014) [15] e Masuero (2017) [13], a precisão dos métodos de separação por líquidos densos é superior à jigagem pela dependência única da densidade do material, excluindo outros fatores como velocidade de escoamento do fluido.

Assim como a separação por líquidos densos, a separação do agregado reciclado utilizando dois ciclos de jigagem hidráulica, estudado por Dos Santos (2020) [3], se mostrou eficaz a partir da análise dos resultados, pois também apresentou bom desempenho para baixo consumo de cimento/MPa, podendo ser uma alternativa a ser estudada para uso em larga escala no futuro, a fim de obter material reciclado de boa

qualidade para produção de concretos estruturais, já que o processo de separação por líquidos densos é de difícil utilização em escala real.

REFERÊNCIAS

1. ABRELPE- **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo.

2. BRASIL. **Resolução nº 307. CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, de 5 julho de 2002. Diário Oficial da União, n. 136 , p. 95-96 , 17 jul. 2002.

3. DOS SANTOS, V. L. G. **Beneficiamento em jigue hidráulico para melhoria da qualidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição (RCD) utilizados em concretos**. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

4. LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

5. SAMPAIO, C.H.; CAZACLIU, B.G.; MILTZAREK, G.L.; AMBRÓS, W.M.; KRONBAUER, M.A.; TUBINO, R.M.C.; DAL MOLIN, D.C.C.; OLIVA, J.; WASKOW, R.; DOS SANTOS, V.L.G. Demolished concretes recycling by the use of pneumatic jigs. **Waste Managment and Research**, v.38(4), p. 392-399, 2020.

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**. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

7. VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, 2004.

8. ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento Mecânico dos Concretos**. São Paulo, 2005. 149f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 173 São Paulo, 2005.

9. MONDINI, B. G. **Avaliação da variabilidade de concretos utilizando resíduos de construção e demolição submetidos ao processo de separação por jigagem a seco.** 2018. 130p. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

10. MALYSZ, G.N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado reciclado** 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

11. MATOS, R.S.C. **Avaliação do efeito da jigagem em diferentes faixas granulométricas sobre as características do agregado graúdo reciclado de RCD e as propriedades do concreto.** 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

12. CUNHA, M.G.C. **Viabilidade do uso de RCD proveniente da geração dos concretos convencional e de alta resistência através da utilização do jigue como agente do beneficiamento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017

13. MASUERO, G.B. **Características mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto após separação por densidade.** Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

14. CARRIJO, P.M. **Análise da da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto.** São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.

15. AMARAL FILHO, J. R. **Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil.** 2014. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.



CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE ELEVADA REATIVIDADE PRODUZIDA VIA FRACIONAMENTO DENSIMÉTRICO E MOAGEM ULTRAFINA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081115

LINHARES, BEATRIZ DIAS FERNANDES[1]; LEMOS, MÔNICA NUNES[1]; CORDEIRO, GUILHERME CHAGAS[1]
[1]UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: GCC@UENF.BR

RESUMO: Este trabalho visa avaliar a eficácia do fracionamento densimétrico na produção de uma cinza do bagaço de cana-de-açúcar de elevada pozolanicidade. Inicialmente, uma cinza rica em quartzo foi coletada em caldeira industrial e submetida ao fracionamento densimétrico para remoção do quartzo contaminante por meio de decantação. Em seguida, a parcela de cinza potencialmente pozolânica foi cominuída mediante moagem ultrafina. As composições química e mineralógica obtidas foram adequadas a materiais pozolânicos. Ensaios de condutividade elétrica, índice de desempenho e calorimetria isotérmica confirmaram a elevada reatividade da cinza produzida pelo método proposto em comparação com a cinza original.

PALAVRAS-CHAVES: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar; Pozolana; Fracionamento densimétrico; Moagem ultrafina; Atividade pozolânica.

PRODUCTION OF A HIGHLY POZZOLANIC SUGARCANE BAGASSE ASH VIA DENSIMETRIC SEPARATION AND ULTRIFINE GRINDING

ABSTRACT: This study aims to evaluate the effectiveness of densimetric separation in the production of a highly pozzolanic sugarcane bagasse ash. Initially, a quartz-rich ash was collected in industrial boilers and submitted to wet densimetric separation to remove most of the quartz contaminant by decantation. Then, the potentially pozzolanic ash was subjected to ultrafine grinding. Chemical and mineralogical compositions obtained were appropriate to pozzolanic materials. Electrical conductivity, mechanical performance index and isothermal calorimetry tests confirmed the highly reactive material produced by the proposed method in comparison with the original ash.

KEYWORDS: Sugarcane bagasse ash; Pozzolan; Densimetric separation; Ultrafine grinding; Pozzolanic activity.

1 | INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, pesquisas têm sido desenvolvidas acerca da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material suplementar cimentício [1-3]. Assim, estudos indicaram melhorias nas propriedades mecânicas[1,2,4], reológicas[2] e de durabilidade[2,5] de concretos devido à atividade pozolânica e ao efeito fíler da cinza[6]. Além disso, o emprego da cinza em substituição ao cimento conjuga dois importantes benefícios ambientais, que são a destinação correta para uma cinza silicosa e a redução na emissão de gases intensificadores de efeito estufa[7] gerados durante a produção de

cimento Portland.

Apesar dos benefícios promovidos pela cinza e sua grande disponibilidade no mundo, alguns fatores precisam ser verificados antes do seu emprego como adição mineral. Uma vez que a queima do bagaço ocorre de forma não controlada nas caldeiras, a cinza pode apresentar composição química e tamanho de partícula variados[8]. Além disso, é recorrente a presença de contaminantes, geralmente oriundos do solo ou de fertilizantes, sendo quartzo o mais comum para este tipo de material[6,8]. Diante disso, procedimentos como moagem, queima controlada e lixiviação ácida têm sido empregados com o objetivo de aumentar a uniformidade e a concentração de sílica amorfa na cinza[6,8,9]. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência do fracionamento densimétrico e da moagem ultrafina na reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Produção e caracterização das cinzas do bagaço

A cinza do bagaço foi coletada em uma usina localizada na cidade de Campos do Goytacazes/RJ. A cinza original (*in natura*) foi submetida ao processo de fracionamento densimétrico com o objetivo de separar do quartzo, por meio da diferença de densidade, a fração de cinza potencialmente pozolânica. Este método foi adaptado de Andreão *et al*.[10]. A primeira etapa do fracionamento consistiu em imergir 2 L de cinza em 15 L de água, seguido de agitação manual da dispersão por 1 min. Após 3 min de repouso, 10 L da dispersão foram retirados e colocados em repouso por 72 h com objetivo de promover a decantação da parcela sólida. Após esse período, o volume de água em excesso foi retirado por sifonamento e a cinza decantada foi seca em estufa a 100 °C por 24 h. A amostra de cinza dispersa gerada pelo fracionamento densimétrico foi denominada CBCA-D, com rendimento de cerca de 8%.

Na sequência, a cinza original e uma parcela da cinza dispersa foram cominuídas em um moinho atritor (Union Process) por 2 h e 1 h, respectivamente. Os tempos de moagem foram ajustados para a obtenção de curvas granulométricas similares, com tamanho característico D_{50} inferior a 10 μm[8]. Após a moagem, as cinzas original e dispersa moídas foram nomeadas CBCA-OM e CBCA-DM, respectivamente.

A composição de óxidos das cinzas foi obtida por análise semi-quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (Shimadzu EDX-720). A perda ao fogo e a massa específica foram obtidas de acordo com a NBR NM 18[11] e a NBR 16605[12], respectivamente. A distribuição do tamanho de partícula das amostras foi determinada por granulometria a laser (Malvern Mastersizer 2000). Ensaios de difratometria de raios X (equipamento Rigaku Miniflex 600) foram realizados com radiação de Cu-kα no intervalo 2θ entre 8 e 70°, tensão de 40 kV, corrente de 15 mA, passo de 0,02° e velocidade angular de 5°/min para determinação da mineralogia das cinzas. Análises quantitativas foram realizadas por refinamento de Rietveld[12] para quantificação das fases constituintes.

A atividade pozolânica das cinzas foi avaliada pelo método de condutividade elétrica proposto por Luxán *et al*.[14]. A variação da condutividade foi monitorada durante 20 min com uso de condutivímetro Alfakit AT 230. A pozolanicidade também

foi analisada através de índice de desempenho[15]. Para o ajuste da consistência das argamassas, neste caso, teores específicos de aditivo superplastificante (éter carboxílico modificado com massa específica de 1,12 g/cm³ e teor de sólido de 28,9%) foram utilizados. O ensaio de compressão axial foi realizado em uma máquina universal de ensaios Shimadzu UHI-500kNI, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min.

2.2 Ensaio de calorimetria isotérmica

A hidratação de pastas cimentícias contendo as cinzas produzidas foi avaliada por meio do ensaio de calorimetria isotérmica (calorímetro Calmetrix I-CAL 2000) por 72 h a 25 ± 0,1 °C. Neste caso, pastas com 20% de substituição em massa do cimento Portland por cada tipo de adição (P-*X*, sendo *X* o tipo de cinza) foram confeccionadas, além de uma pasta de referência (P-REF) produzida sem o uso de adição mineral. Um cimento sem adição mineral (CPP classe G[16]) foi utilizado para a produção das pastas com relação água-material cimentício igual a 0,4 e teor de superplastificante igual a 0,03%. A mistura das pastas foi feita em misturador Hamilton Beach por 2 min a 600 rpm.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a composição de óxidos e os valores de perda ao fogo das cinzas produzidas. As amostras, como esperado, possuem altos teores de sílica (SiO_2) - superiores a 50% em todas as cinzas. O fracionamento densimétrico promove mudanças na composição da cinza, com destaque para a redução do teor de SiO_2 pela remoção de boa parte do quartzo presente na cinza original. Além disso, a CBCA-D também apresenta aumento nos teores de Al_2O_3, K_2O, CaO e P_2O_5 devido a uma maior concentração desses compostos na cinza dispersa. No que se refere à perda ao fogo, as cinzas apresentam valores inferiores ao teor máximo de 6% estabelecido na NBR 12653[17]. A alta concentração de matéria orgânica é indesejável em cinzas pozolânicas uma vez que diminui a concentração de sílica amorfa e, consequentemente, a atividade pozolânica da cinza[8]. Além disso, cinzas com elevada perda ao fogo promovem aumento nos tempos de pega de sistemas cimentícios[18].

Cinza	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	P_2O_5	SO_3	TiO_2	MnO	PF*
CBCA-OM	68,4	14,3	7,4	3,0	2,1	–	1,6	1,3	0,1	1,7
CBCA-D / CBCA-DM	54,5	22,3	6,6	5,0	3,4	1,6	1,2	1,2	0,2	4,1

* PF - perda ao fogo.

Tabela 1 – Composição de óxidos e perda ao fogo das cinzas (%)

Os difratogramas de raios X das cinzas estão indicados na Figura 1a e apontam a presença de quartzo tanto na CBCA-OM quanto na CBCA-D. A contaminação por quartzo é recorrente em cinzas do bagaço e tem sua origem associada à parcela de areia aderida à cana-de-açúcar durante sua colheita e operações de limpeza das caldeiras[8]. O difratograma da CBCA-D apresenta um halo de amorfismo entre os

ângulos 2θ iguais a 20 e 30° (detalhe na Figura 1a), o que indica a presença de sílica amorfa. A Tabela 2 mostra a quantificação das fases cristalinas das cinzas obtida por refinamento de Rietveld e confirma a presença predominante de quartzo na CBCA-OM. A CBCA-D, por sua vez, apresenta maior concentração de fase amorfa (94,8%) em comparação com a cinza original (40,3%). Para a CBCA-D, observa-se ainda uma redução expressiva do teor de quartzo, sendo 59,7% para a CBCA-OM e apenas 5,2% para a CBCA-D. Esses resultados são positivos e confirmam a eficácia do processo de fracionamento densimétrico para concentrar a parcela amorfa da cinza e reduzir a sua contaminação por quartzo. Resultados similares foram obtidos por Andreão *et al*.[10], que desenvolveram um processo de separação densimétrica com a retirada da parcela mais reativa por peneiramento.

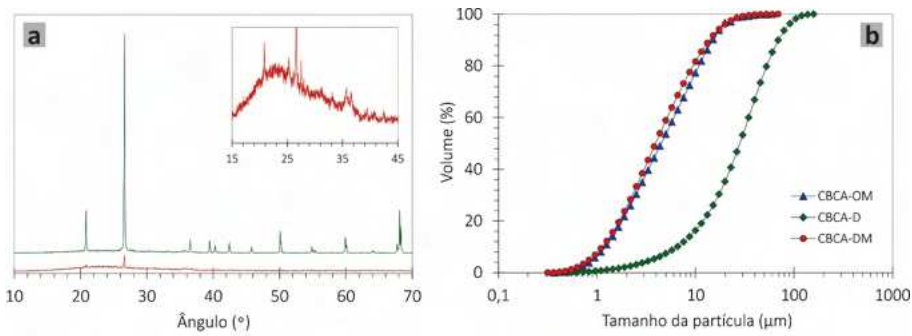


Figura 1 – Difratogramas de raios X (a) e curvas granulométricas (b) das cinzas. Os picos nos difratogramas de CBCA-OM (verde) e CBCA-DM (vermelho) se referem ao quartzo (ficha ICDD #01-083-0539)

Cinza	Massa específica (g/cm³)	D_{50} (µm)	ID (%)	Quantificação (%)	
				Quartzo	Amorfos
CBCA-OM	2,56	3,93	110	59,7	40,3
CBCA-D	2,32	28,20	126	5,2	94,8
CBCA-DM	2,32	3,85	132	5,2	94,8

Tabela 2 – Principais parâmetros físicos e quantificação das fases das cinzas

A Figura 1b apresenta a distribuição granulométrica das cinzas e a comparação entre as curvas indica que as cinzas moídas (CBCA-OM e CBCA-DM) apresentam granulometrias similares, com valores de D_{50} inferiores a 10 mm (Tabela 2). A cinza não moída (CBCA-D) apresentou, como esperado, granulometria grosseira, com um D_{50} igual a 28,20 µm. A homogeneização e redução das partículas é um procedimento importante para garantir reatividade das cinzas, uma vez que a atividade pozolânica é potencializada pelo aumento da superfície específica associada à redução do tamanho de partícula[6,8,19].

Os valores de massa específica estão indicados na Tabela 2, sendo iguais a

2,32 g/cm³ para as amostras CBCA-D e CBCA-DM, e 2,56 g/cm³ para a CBCA-OM. De forma geral, cinzas que contém ferro e quartzo tendem a ter maiores valores de massa específica, enquanto materiais predominantemente formados por sílica amorfa e com poucas impurezas apresentam menores valores de massa específica. Dessa forma, os valores encontrados estão coerentes com a composição química e mineralógica das cinzas, pois o menor valor de massa específica da cinza dispersa pode ser atribuído à concentração de sílica amorfa e redução de quartzo.

Os resultados de condutividade elétrica estão indicados na Figura 2. As curvas mostram de forma evidente os diferentes comportamentos das três cinzas investigadas. De acordo com a classificação proposta por Luxán *et al.*[14], baseada na variação da condutividade aos 2 min, as amostras CBCA-DM e CBCA-D podem ser classificadas como materiais de boa pozolanicidade, com variações de 1,51 mS/cm e 1,34 mS/cm, respectivamente. O melhor resultado da CBCA-DM, em relação a CBCA-D, se deve à moagem ultrafina, tendo em vista o menor tamanho de partícula da amostra dispersa e moída, que promove aumento da superfície específica do material e, consequentemente, maior solubilidade da sílica amorfa[19]. A CBCA-OM apresenta variação de 0,46 mS/cm, sendo classificada como cinza de média pozolanicidade. Posto que a CBCA-OM e a CBCA-DM apresentam granulometrias similares, a variação mais pronunciada na condutividade da CBCA-DM pode ser atribuída à menor presença de quartzo em sua composição. Os resultados obtidos evidenciam a influência do fracionamento densimétrico na atividade pozolânica das amostras, considerando a maior reatividade das cinzas oriundas do pré-tratamento em comparação com a cinza que foi submetida apenas à moagem.

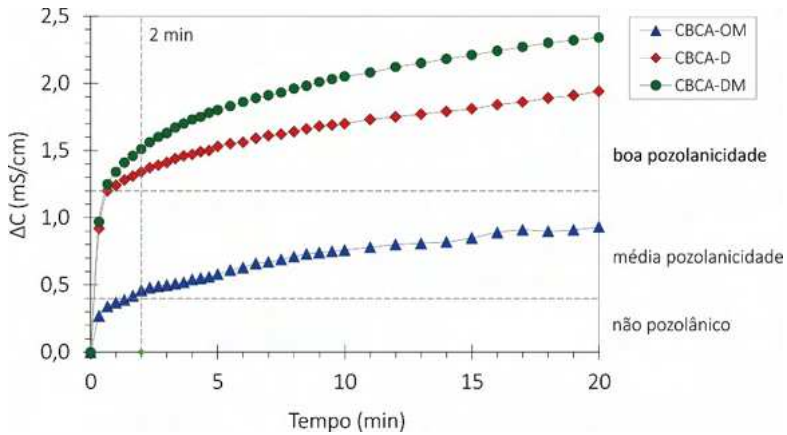


Figura 2 – Variação da condutividade elétrica (ΔC) durante 20 minutos

Os valores de índice de desempenho estão também indicados na Tabela 2. O caráter pozolânico das amostras foi confirmado pelos resultados superiores aos 90% mínimos estabelecidos pela NBR 12653[17]. A CBCA-DM tem o melhor desempenho dentre as cinzas estudadas, seguida da CBCA-D, com índices de 132% e 126%, respectivamente. A CBCA-OM apresenta um resultado inferior, com ID de 110%, que pode ser atribuído à contaminação por quartzo. É importante enfatizar que o índice de desempenho é influenciado pelos efeitos físicos e químicos das cinzas[6,19]. Os resultados

obtidos foram superiores aos encontrados em estudos anteriores para esse tipo de material[9], e corroboram os resultados de condutividade elétrica, o que confirma os efeitos pozolânicos específicos desenvolvidos por cada cinza.

A Figura 3a mostra as curvas de fluxo de calor de hidratação das pastas. A mistura P-CBCA-OM não apresenta diferença significativa em relação à P-REF nas 6 h iniciais de hidratação. A baixa reatividade da CBCA-OM mantém o tempo de início do período de aceleração. Esse comportamento é típico de cinzas do bagaço com altos teores de quartzo[8,19]. Para as pastas com cinzas dispersas, há uma sensível aceleração da hidratação, que está associada à elevada finura das cinzas produzidas por fracionamento densimétrico[8]. O pico associado à hidratação do C_3A é mais pronunciado nas pastas com as cinzas devido à presença expressiva de Al_2O_3 nas amostras[8]. As curvas referentes ao calor liberado pelas pastas são apresentadas na Figura 3b. Durante as primeiras horas de hidratação, observa-se que as misturas P-CBCA-DM e P-CBCA-D liberam mais calor que a P-REF. Esse aumento é consequência da atividade pozolânica e da nucleação heterogênea promovidas pelas cinzas. Além disso, o elevado teor de Al_2O_3 presente na composição das cinzas também contribui para o aumento do calor de hidratação das duas pastas. Ao final das 72 h, todas as pastas com cinza apresentam valores máximos de energia liberada inferiores ao da P-REF. Considerando que a CBCA-OM é a menos reativa dentre as cinzas estudadas, é coerente que seu processo de hidratação desenvolva menos calor acumulado.

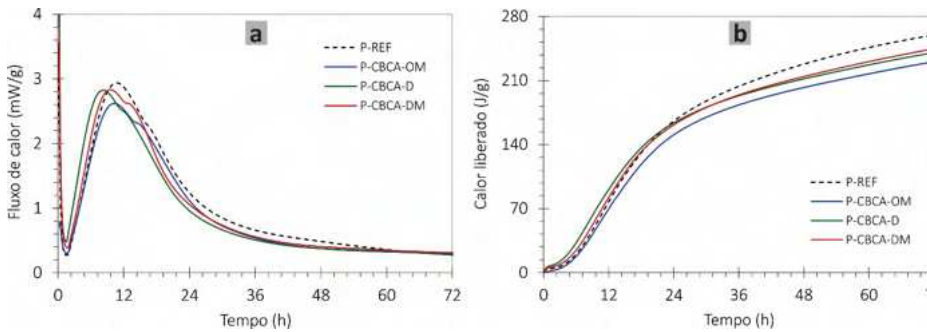


Figura 3 – Curvas de fluxo de calor (a) e calor liberado (b) das pastas cimentícias, calculadas em função da massa de material cimentício

4 | CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que o fracionamento densimétrico atingiu o objetivo de separar a fração reativa da cinza de grande parte do quartzo contaminante. A amostra CBCA-DM apresentou maior reatividade dentre as cinzas avaliadas em decorrência de sua granulometria ultrafina, presença elevada de fases amorfas (SiO_2 e Al_2O_3) e baixa contaminação por quartzo. Além disso, a adição das diferentes cinzas provocou redução no calor de hidratação liberado pelas pastas, embora as cinzas dispersas causaram uma sensível aceleração nas primeiras horas de hidratação. Pela comparação entre CBCA-D e CBCA-DM é possível concluir que o fracionamento densimétrico foi mais relevante para a reatividade das cinzas que a

moagem ultrafina, uma vez que a redução expressiva no tamanho das partículas não acarretou aumento proporcional de atividade pozolânica. Este comportamento é interessante economicamente para a produção de CBCA em larga escala, tendo em vista que a moagem requer maior consumo de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

1. GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 6, p. 515-524, 2007.

2. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 5, p. 487-493, 2008.

3. MINNU, S. N.; BAHURUDEEN, A.; ATHIRA, G. Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, 124836, 2021.

4. 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, n. 2, p. 564-573, 2018.

5. CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3352–3358, 2009.

6. 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, n. 5, p. 410-418, 2008.

7. FAIRBAIRN, E. M. R.; AMERICANO, B. B.; CORDEIRO, G. C.; PAULA, T. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; SILVOSO, M. M. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO_2 emissions reduction and potential for carbon credits. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 9, p. 1864-1871, 2010.

8. BARBOSA, F. L.; CORDEIRO, G. C. Partial replacement by different sugar cane bagasse ashes: hydration-related, compressive strength and autogenous shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121625, 2021.

9. CORDEIRO, G. C.; LEMOS, M. N.; XAVIER, K. V.; LIMA, C. P. F. de. Production of agroindustrial ashes with pozzolanic activity via acid leaching, conjugated burning and ultrafine grinding. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 189-203, 2020.

10. 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.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

13. LIU, H.; KUO, C. Quantitative multiphase determination using the Rietveld method with high accuracy. **Materials Letters**, v. 26, p. 171-175, 1996.

14. LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 1, p. 63-68, 1989.

15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland para poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2015.

18. 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.

19. 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.



GEOPOLÍMERO A BASE DE METACAULIM: MEDIDAS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081116

COSTA, RAYARA PINTO[1]; PY, LUCAS GOLDENBERG[1]; SACARDO, LUCAS EDUARDO PERIN[1]; LONGHI, MARLON AUGUSTO[1]; KIRCHHEIM, ANA PAULA[1]
[1] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
EMAIL: RAYARAPINTOCOSTA@GMAIL.COM

RESUMO: O geopolímero *é* um ligante obtido a partir da ativação química de uma fonte de aluminosilicatos em solução alcalina, como por exemplo argilas calcinadas. Possui propriedades similares ao cimento Portland, mas com reduzido impacto ambiental. Avaliou-se a resistência mecânica e cinética de hidratação deste ligante desenvolvido com duas argilas cauliníticas calcinadas, AE23 (de elevada pureza) e AE27 (um resíduo da extração do carvão mineral). As pastas de geopolímero foram avaliadas perante resistência à compressão e ensaio de impedância eletroquímica. Os resultados apontaram o acentuado desenvolvimento de resistência mecânica e impedância eletroquímica dos geopolímeros com AE23 comparados a AE27.

PALAVRAS-CHAVES: Geopolímero, argilas, impedância eletroquímica.

ABSTRACT: The geopolymer is a binder obtained from the chemical activation of aluminosilicates source in alkaline solution, such as calcined clays. It has properties similar to Portland cement, but with reduced environmental impact. The mechanical and hydration kinetic resistance of geopolymers developed with two calcined kaolinitic clays, AE23 (high purity) and AE27 (a residue from coal extraction) were evaluated. The geopolymer pastes were evaluated for compressive strength and electrochemical impedance testing. The results showed the accentuated development of mechanical strength and electrochemical impedance of geopolymers with AE23 compared to AE27.

KEYWORDS: Geopolymer, clays, electrochemical impedance.

1 | INTRODUÇÃO

Em 2020, a produção anual do cimento Portland foi estimada em 4,1 bilhões de toneladas, e no Brasil em torno de 57 milhões de toneladas [(1)]. Devido a utilização em larga escala, e o processo de produção envolvido, o cimento Portland (CP) é uma das maiores fontes de emissão de CO_2, sendo a indústria cimenteira responsável por cerca de 8% das emissões mundiais totais [(2) (3)]. Assim, pesquisas vêm sendo realizadas buscando o desenvolvimento de cimentos alternativos ao cimento Portland e que gerem impactos ambientais reduzidos, principalmente no que tange à emissão de CO_2, entre elas, os geopolímeros [(4)]. Quando adequadamente dosados, eles podem apresentar propriedades mecânicas comparáveis ou até melhores que o CP, além de possuírem melhor potencial ecológico [(4) (5)].

Nos geopolímeros a fonte de aluminosilicatos ao reagirem com ativadores alcalinos, por meio de mecanismos de geopolimerização, formam como principal produto da reação um gel, como por exemplo o silico aluminato de sódio hidratado (conhecido na química do cimento como N-A-S-H), que pode apresentar elevadas resistências mecânicas [6]. Para que ocorra a reação, é necessário o uso de ativadores alcalinos, tais como hidróxidos e silicatos, sendo os mais usuais a base de sódio e potássio. Quanto aos precursores, os principais utilizados são argilas calcinadas (predominantemente metacaulim), cinza volante e escória de alto forno [7] [8] [9].

O uso de argilas na produção dos geopolímeros tem papel importante no desenvolvimento da tecnologia no Brasil. Atualmente, a maioria da cinza volante e escória de alto forno produzidas anualmente são utilizadas como adição mineral em cimento Portland, por isso, as argilas poderiam ser utilizadas para atender à demanda futura na produção desse ligante [10]. As cauliníticas, por exemplo, tem a caulinita como principal mineral e embora apresentem baixa reatividade para a geopolimerização em seu estado natural, se tornam reativas quando passam por um processo de ativação térmica (calcinadas entre 700-900 °C). A caulinita é transformada em metacaulim e há a formação de fase amorfa [11] [12]. Além disso, outros argilominerais (como por exemplo illita e esmectita) também podem ser utilizados como precursores na síntese de geopolímeros [13].

Apesar desse conhecimento prévio, não se tem total controle e entendimento da influência da pureza da argila, relacionada ao teor de metacaulinita formada, nas propriedades dos geopolímeros, de modo que pesquisas são necessárias. Assim, este artigo avalia propriedades mecânicas e químicas de geopolímeros produzidos com duas argilas calcinadas, uma com elevado teor de metacaulinita e outra, um resíduo da extração de carvão mineral por ensaios de resistência à compressão e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS).

A espectroscopia de impedância é um método não destrutivo, no qual se utilizam frequências de impedância para analisar as propriedades de um material [14]. A mistura de cimento e água entre os eletrodos formam uma célula dielétrica, que com a aplicação de um campo de energia elétrica alternada, faz os íons percorrerem a fase aquosa em direção aos eletrodos, produzindo um efeito de condutividade. A partir deste princípio, é possível medir a resistência que o material impõe ao aplicar-se uma carga elétrica [15]. Valores de impedância mais elevados, por exemplo, são indicativos de um maior preenchimento das redes de poros durante a hidratação, reduzindo, portanto, a condutividade.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Empregou-se como material precursor duas argilas: AE23, de origem natural proveniente de Pantano Grande (RS); AE27, um resíduo da extração de carvão mineral de Candiota (RS). No beneficiamento, as argilas in natura foram destorroadas, britadas, e submetidas a secagem em estufa a 100 ºC até constância de massa. Em seguida, foram peneiradas em malha 0,6 mm para obter tratamento térmico homogêneo. Submeteu-se o material passante a calcinação em mufla elétrica com taxa de aquecimento de 10 °C/min e patamar de 1 h à temperatura de 800±5 ºC, com posterior choque térmico. Então, executou-se moagem em moinho de bolas durante 1 h e ensaio de granulometria

por difração a laser para determinar o tamanho das partículas. A metodologia do beneficiamento e a composição físico-química das argilas foram obtidas em estudo anterior onde se pode obter mais informações [16].

Na análise físico-química das argilas, empregou-se os seguintes equipamentos: fluorescência de raios X (FRX) com Shimadzu XRF 1800; granulometria a laser com Cilas 1180, água como solvente e ultrassom durante 60s para dispersar as partículas [16].

Como ativador, utilizou-se micropérolas NaOH P.A, marca Dinâmica 99% pureza, e Na_2SiO_3, marca Manchester com 14,8% Na_2O, 32% SiO_2, densidade 1,58 g/cm³ e 53,07% H_2O. Na dosagem, usou-se as argilas como precursor em solução ativadora de NaOH com 15 e 20% e módulo de sílica (Ms) SiO_2/Na_2O de 0 e 1,0. A relação água/sólidos adotada foi 0,4. Conduziu-se a reação de geopolimerização em temperatura ambiente (25°C) e a mistura das pastas por 7 min em velocidade lenta em argamassadeira planetária. Por fim, preencheu-se as formas de acrílico em duas camadas e adensou-se em mesa vibratória por 20 e 40 s respectivamente.

Na resistência à compressão ensaiaram-se cinco corpos de prova cúbicos de dimensão 20 mm, nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias para cada dosagem. As amostras foram desmoldadas após 24 h e realizou-se cura em recipiente com lâmina de água em temperatura ±40 °C. O ensaio foi conduzido em prensa EMIC DL 20000, com célula de carga acoplada de 200 kN, precisão de 1 N e deslocamento de 0,5 mm/min.

A metodologia da espectroscopia de impedância eletroquímica segue Suryanto [17], sendo moldado cp cúbico, 50 mm. Na célula colocou-se um par de pinos de aço inoxidável (Ø 2,4 mm), espaçados 25 mm um do outro, e imersos a profundidade de 25 mm na pasta. Após compactação, as partes expostas foram cobertas com filme plástico, para reduzir a evaporação [18]. Realizou-se as medições por potenciostato da Autolab modelo PGSTAT 302, usando faixa de frequência de 1 kHz a 1 MHz, e amplitude de sinal de 350 mV. As medições foram conduzidas no modo voltagem de acionamento, em ciclos de 4 min, durante as 72 h após a aferição. Os equipamentos ficaram em modo de espera até seu acionamento, no qual foram realizadas 7 medições às 0h, 0,5, 1, 6, 12, 24 e 72h após moldagem. Para este ensaio, escolheu-se os traços com 20% de NaOH e Ms SiO_2/Na_2O 1,0 (AE20.1).

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de FRX (%), perda ao fogo [PF (%)] das argilas AE23 e AE27 in natura, granulometria a laser após calcinação a 800 °C e moagem das argilas são apresentados na Tabela 1 [16]. D10, D50 e D90 indicam o diâmetro ao qual 10%, 50% e 90% das partículas são inferiores. Dméd é o diâmetro médio.

Argila	Composição química											Granulometria			
	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	P_2O_5	SO_3	TiO_2	PF	D10	D50	D90	Dméd
AE23	28,5	56,4	1,1	0,96	1,0	-	0,1	-	0,1	0,1	11,6	0,9	5,2	17,3	7,2
AE27	20,9	65,0	0,4	2,56	1,9	0,8	0,1	<0,05	-	0,9	7,3	0,7	4,5	22,3	8,1

Tabela 1 – Caracterização físico-química das argilas

Fonte: adaptado Dornelles et al. (2018)

Em uma metacaulinita de elevada pureza, é esperado que a quantidade de óxidos de alumina e sílica sejam similares. Os dados mostram que AE23 e AE27 apresentam valores entre 20-30% de , valor inferior ao teor de sílica constatado, o que sugere a presença de impurezas junto a caulinita [19] [20]. O maior teor de sílica está associado a sua parcela não reativa, usualmente em forma de quartzo. A presença desta associada a caulinita pode influenciar a microestrutura, a cinética de reação e as propriedades mecânicas dos geopolímeros [20]. A análise mineralógica das amostras *in natura* confirma a existência de outras fases minerais como o quartzo e mostra picos mais intensos de caulinita para AE23 [16]. Também, para relação /, a argila AE27 exibe índice 57% superior a AE23. As propriedades mecânicas dos geopolímeros são afetadas consideravelmente pelas relações / [21], no entanto, essa relação é válida apenas para a parcela reativa dos óxidos [22]. Por outro lado, nas características físicas, os tamanhos das partículas das argilas têm valores próximos.

Os resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) obtidos para as amostras de argila AE23 e AE 27 estão representadas na Figura 1. Ela mostra diagramas de Nyquist, onde pode ser visto a Impedância Real (Z') versus a Impedância Imaginária (Z"), valores medidos em ohms (Ω). Verifica-se na pasta com AE23, o crescimento da impedância em comparação ao início e fim das medições (real e imaginária). Entretanto, nota-se maior instabilidade durante a primeira hora de hidratação, causando redução no valor da impedância. Após 1 h, é visível o crescimento da impedância conforme a diminuição do líquidos nos poros [24]these empirical relationships can limit the application of the electrical measurements to a specific material or exposure history. To facilitate the development of a general method that is applicable to a concrete member in service, this paper characterizes the electrical conduction in cement paste subjected to drying (desorption. Os resultados do traço com AE27 apresentaram uma evolução constante, onde os valores de impedância aumentam até o fim das medições. O aumento da resistividade que ambas apresentam, por si só é explicado pela própria hidratação que ambos os traços sofrem [25].

Para facilitar a comparação, os geopolímeros contaram com mesma dosagem para este ensaio, então a diferença encontra-se na argila. Ao confrontar os dados das amostras AE23 e AE27, é visível a diferença entre os valores de resistência que cada uma emprega na passagem de energia (impedância). Verifica-se que a primeira (AE23) inicia com uma impedância inferior, porém no decorrer da hidratação, termina com valores muito superiores. Isso pode ocorrer devido ao maior preenchimento das redes de poros, uma vez que AE23 apresenta maior teor de caulinita (92,4%), se comparado a AE27 (47,1) e, portanto,reduzindo condutividade [25].

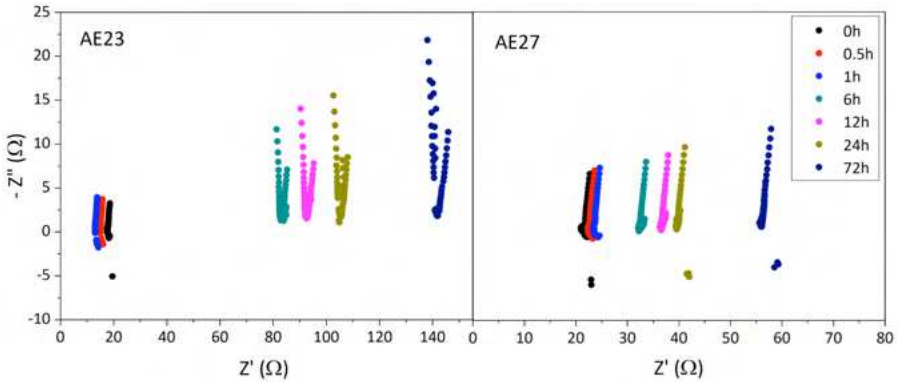


Figura 1 - Evolução da Impedância nos geopolímero com AE23 e AE27 (NaOH 20% e Ms 1,0)

Fonte: elaborado pelos autores

Figura 2 mostra a resistência à compressão dos geopolímeros. Nela nota-se o acentuado desenvolvimento da resistência com AE23 em relação a AE27. Isto ocorre devido AE23 possuir teor superior de metacaulim, após calcinação, e de alumina, comparativamente a AE27.

Também, nas dosagens com apenas NaOH como ativador alcalino, percebe-se redução da resistência mecânica (0-15 e 0-20). Isto pode estar atrelado ao teor de ativadores de NaOH, que favorece à formação de estruturas zeolíticas, particularmente após períodos de cura sob condição úmida ou após breve período a temperatura elevada [24]. Em contrapartida, o aumento do conteúdo de silicato de sódio retarda a taxa de formação de zeólitas, promovendo altas resistências, como é observado nas dosagens com silicatos. Além disso, o uso de silicato proporciona a formação de uma estrutura mais densa e reticulada, que reflete no acréscimo de resistência mecânica [26] [27].

Adicionalmente, realizou-se análise estatística de variância (ANOVA) para interpretação da significância entre fatores para AE23. Os fatores tempo de cura e Ms mostram-se significativos no que diz respeito à resistência mecânica das amostras. Desta forma, pode-se dizer que a melhor interação observada estatisticamente neste estudo para a argila AE23 foi a composição com teor de NaOH de 15% e Ms SiO_2/Na_2O igual a 1,0. Para AE27 esta análise não pôde ser realizada, devido a resistências nulas obtidas em algumas dosagens.

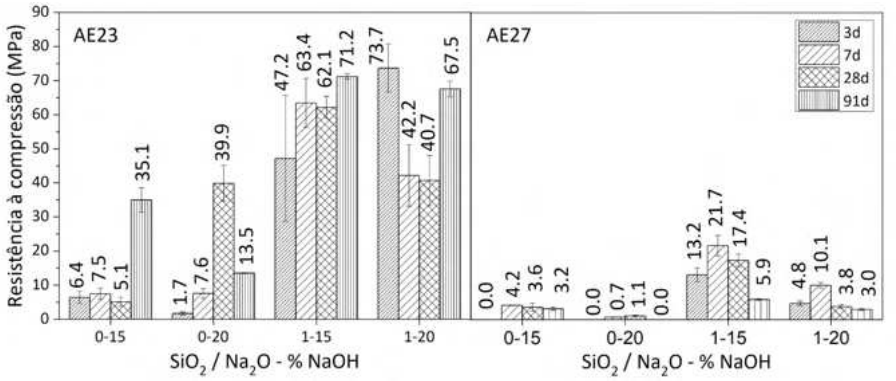


Figura 3 – Resistência à compressão dos geoplímeros com argila AE23 e AE27
Fonte: elaborado pelos autores

Embora não tenha sido viável realizar medições de resistência à compressão em idades inferiores a 3 dias por questões técnicas, o dado de impedância do traço AE20.1 (Na_2O 20% e SiO_2/Na_2O 1,0) se correlaciona ao de resistência à compressão. São obtidos valores mais elevados de impedância e resistência no cimento com AE23 comparativamente a AE27. A matriz mais compacta (com maior preenchimento das redes de poros) sugerida nos resultados de impedância eletroquímica, se reflete em resistências à compressao mais elevadas.

4 | CONCLUSÕES

No geral, os geopolímeros produzidos com argila AE23 apresentaram melhor desempenho comparativamente a AE27, resíduo proveniente da extração do carvão mineral, em termos de resistência à compressão e impedância eletroquímica. Ressalta-se, que embora esses materiais sejam argilas cauliníticas, as mesmas possuem diferenças nas características químicas que podem ter influenciado na reatividade e nos produtos de reação dos geopolímeros. AE23, por exemplo, apresenta maior teor de metaculinita, o que proporciona melhores resultados. Além disso, o silicato de sódio proporciona um geopolímero mais denso e resistente.

REFERÊNCIAS

1. U.S. Geological Survey, **Mineral Commodity Summaries 2021**. 2021.

2. R. M. ANDREW. Global CO_2 emissions from cement production. **Earth Syst. Sci. Data**, v. 10, p. 195–217, 2017.

3. B. C. MCLELLAN, R. P. WILLIAMS, J. LAY, A. VAN RIESSEN, AND G. D. CORDER. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **J. Clean. Prod**., v. 19, n. 9–10, p. 1080–1090, 2011.

4. P. H. R. BORGES, T. M. DE F. LOURENÇO, A. F. S. FOUREAUX, AND L. S. PACHECO. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambient. Construído**, v. 14, n. 2, p. 153–168, 2014.

5. M. A. LONGHI, E. D. RODRÍGUEZ, S. A. BERNAL, J. L. PROVIS, AND A. P. KIRCHHEIM. Valorisation of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. **J. Clean. Prod.**, v. 115, p. 265-272, 2016.

6. P. DE SILVA, K. SAGOE-CRENSTIL, and V. SIRIVIVATNANON. Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2. **Cem. Concr. Res.**, v. 37, n. 4, p. 512–518, 2007.

7. P. DUXSON AND J. L. PROVIS. Designing precursors for geopolymer cements. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 91, n. 12, p. 3864–3869, 2008.

8. J. L. PROVIS. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Mater. Struct.**, v. 47, p. 11–25, 2014.

9. J. L. PROVIS AND S. A. BERNAL. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials **Annu. Rev. Mater. Res**., v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

10. A. HEATH, K. PAINE AND M. MCMANUS. Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 78, p. 75-83, 2014.

11. T. D. S. ROCHA, D. P. DIAS, F. C. C. FRANÇA, R. R. D. S. GUERRA, L. R. D. C. D. O. MARQUES. Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na+ and K+). **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 453–461, 2018

12. J.DAVIDOVITS. Geopolymers based on natural and synthetic metakaolin. A critical review. **Ceramic Engineering and Science Proceedings***,* v. 38, n. 3, p. 201-2013, 2017.

13. L.YUN-MING, H. CHENG-YONG, M. MUSTAFA AL BAKRI, K. HUSSIN. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, v. 83, p. 595–629, 2016.

14. I. KUSAK, M. LUNAK, AND Z. CHOBOLA. Monitoring of Concrete Hydration by Electrical Measurement Methods. **Procedia Eng.**, v. 151, p. 271–276, 2016.

15. P. BARNES AND J. BENSTED. **Structure and Performance of Cements**. 2 ed. Nova York: Taylor e Francis, 2002.

16. A. S. DORNELLES, F. T. SILVA, F. SOUZA, E. RODRÍGUEZ AND A. P. KIRCHHEIM. Caracterização de argilas gaúchas com potencial de aplicação para produção de ligantes alternativos. *In:* 60**°** CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais do 60°Congresso Brasileiro de Concreto CBC 2018**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018.

17. B. SURYANTO, J. O. BUCKMAN, W. J. MCCARTER, AND H. TAHA, In-situ dynamic WetSEM imaging and electrical impedance measurements on Portland cement during early hydration. **Mater. Charact.**, vol. 142, p. 86–100, 2018.

18. H. M. TAHA, W. J. MCCARTER, B. SURYANTO, AND G. STARRS, Frequency- and Time-domain dependency of electrical properties of cement-based materials during early hydration. **Adv. Civ. Eng. Mater.**, v. 6, n. 2, p. 65–83, 2017.

19. T. VAKALOVA, V. POGREBENKOV, V. VERESHAGIN, T. KHABAS, I. REVV. Optimising rational chemical analysis for quantitative determination of thecomposition of clay in soils. **Applied Clay Science**, v. 163, p. 153-163, 2018.

20. TCHAKOUTÉ, H. K. et al. Role of ɣ- on the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 86, p. 305–315, 2018.)

21. X. CHENA, Z. NIUA, J. WANGA, G. RUI ZHUA, M. ZHOUA. Effect of sodium polyacrylate on mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer with different SiO_2 / Al_2O_3 ratio. **Ceramics International,** v. 44, p. 18173–18180, 2018)

22. P. DUXSON, S.W. MALLICOAT , G.C. LUKEY, W.M. KRIVEN, J.S.J. VAN DEVENTER. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 292 p. 8–20, 2007

23. F. RAJABIPOUR AND J. WEISS. Electrical conductivity of drying cement paste. **Mater. Struct. Constr.**, v. 40, n. 10, p. 1143–1160, 2007.

24. A. HUSAIN, K. KUPWADE-PATIL, A. F. AL-AIBANI, AND M. F. ABDULSALAM. In situ electrochemical impedance characterization of cement paste with volcanic ash to examine early stage of hydration. **Constr. Build. Mater**., v. 133, p. 107–117, 2017.

25. J. L. PROVIS, J. S. J. VAN DEVENTER. **Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Application.** 1 ed. Nova York: Woodhead Publishing Limited, 2009.

26. M.A. LONGHI, B. WALKLEY, E.D. RODRÍGUEZ, A.P. KIRCHHEIM, Z. ZHANG, H. WANG. New selective dissolution process to quantify reaction extent and product stability in metakaolin-based geopolymers. **Compos. Part B Eng.**, v. 176, p.107-172, 2019.

27. B. WALKLEY, R. SAN NICOLAS, M.-A. SANI, J.D. GEHMAN, J.S.J. VAN DEVENTER, J.L. PROVIS. Phase evolution of Na2O–Al2O3–SiO2–H2O gels in synthetic aluminosilicate binders. **Dalt. Trans.**, v. 45, p. 5521–5535, 2016.



AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DE POLIPROPILENO TRITURADO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081117

GARCIA; ADSON DE SOUSA[1]; SILVA; BARBARA CRISTINA SOARES[1]; JÚNIOR;PAULO SERGIO BARREIROS DE LEÃO; SOUZA; GRAZIELLE TIGRE DE[3];
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA, CAMPUS DE TUCURUÍ.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ADSON.ED.GARCIA@GMAIL.COM
BARBARASCRISTINA107@GMAIL.COM
PSERGIOLEAOZINHO@GMAIL.COM
GRAZIELLE_TIGRE@HOTMAIL.COM

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização do resíduo de Polipropileno (PP) triturado em substituição a areia na produção de argamassa de revestimento, tendo em vista suas propriedades no estado fresco e endurecido. Portanto, foram realizadas substituições de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em volume do resíduo natural pelo resíduo polimérico em um traço de 1:3. Em seguida, realizou-se as análises das propriedades no estado fresco e estado endurecido. Os resultados encontrados indicaram redução da consistência (22,83%), resistência à compressão (26,21%), e densidade (10,04%). Observou-se também aumento do teor de ar incorporado em até 26,05%.

PALAVRAS-CHAVES: Agregado miúdo, argamassa, polímeros, polipropileno, resíduo.

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate the use of crushed Polypropylene (PP) waste to replace sand in the production of coating mortar, considering its properties in the fresh and hardened state. Therefore, substitutions of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% in volume of the natural residue by the polymeric residue were performed in a 1:3 ratio. Then, the analysis of the properties in the fresh state and hardened state was performed. The results indicated a reduction in consistency (22.83%), compressive strength (26.21%), and density (10.04%). An increase in the content of incorporated air of up to 26.05% was also observed.

KEYWORDS: Fine aggregate, mortar, polymers, polypropylene, waste.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente a sociedade contribui diariamente para a poluição do meio ambiente, através do uso desordenado de materiais plásticos que são utilizados e descartados de forma inadequada em altas quantidades na natureza(1). Neste cenário, o mundo produz mais de 400 megatoneladas de plásticos por ano(2). Já no Brasil em 2019, foram produzidas cerca de 11 milhões de toneladas de lixo plástico(3).

No setor da construção civil, o Brasil demanda cerca de 210 milhões de toneladas de agregados somente para o uso na produção de concretos e argamassas(4). Nesse sentido, sabe-se que essa demanda chegou a 740 milhões toneladas(5). Portanto, a inserção de materiais alternativos, pode ser uma forma de suprir a demanda por

agregados na engenharia civil, na qual também, representa uma diminuição na degradação do meio ambiente e uso de recursos naturais[6].

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar a substituição do resíduo de polipropileno pelo agregado miúdo natural na produção de argamassa para chapisco. Avaliando a influência da incorporação desse resíduo no comportamento das argamassas no estado fresco e estado endurecido. Portanto, a inserção desse material na argamassa tem como finalidade dar ênfase a problemática do descarte inadequado e a reutilização de resíduos poliméricos que ocupam grande volume na natureza, buscando proporcionar valor agregado a esses materiais.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os Para desenvolvimento da presente pesquisa, foi utilizado como aglomerante o cimento CP II F- 32, como agregado miúdo empregou-se a areia quartzosa proveniente do leito do Rio Tocantins e resíduo de polipropileno triturado proveniente de uma cooperativa de resíduos poliméricos localizada no bairro Getat na cidade de Tucuruí-PA. A água utilizada foi proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Vila Permanente.

2.2 Métodos

O resíduo em destaque foi obtido na cooperativa de resíduos poliméricos, localizada no bairro do Getat. Na empresa, foi realizado o beneficiamento do material através da coleta, limpeza, trituração e armazenamento em sacos. As amostras separadas para os ensaios de caracterização foram coletadas, posteriormente misturadas e quarteadas[7].

Com o objetivo de realizar a análise das características físicas dos agregados e avaliar sua aplicação na construção civil, procedeu-se os ensaios de massa específica[8] e massa unitária[9]. Para a análise da densidade do PP, realizou-se uma adaptação utilizando álcool etílico[10]. Posteriormente sucedeu-se o ensaio de absorção de água[11] entretanto, não foi determinada absorção para o resíduo, uma vez que o polipropileno é hidrofóbico[12]. Além disso, realizou-se os ensaios de granulometria[13], sendo possível determinar o módulo de finura (MF) e diâmetro máximo (DM).

Após a caracterização dos agregados, adotou-se um traço rico de chapisco 1:3 com fator a/c de 0,5 e foram feitas substituição em volume de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% do resíduo natural pelo artificial conforme apresenta a Tabela 1.

Teor (%)	Cimento (g)	Areia (g)	PP (g)	Água (g)
0	1500	4500	0	750
5	1500	4275	81,59	750
10	1500	4050	163,17	750
15	1500	3825	244,75	750
20	1500	3600	326,33	750

Tabela 1 – Traço utilizado

Seguida a etapa de produção das argamassas, foram realizadas as análises do comportamento da argamassa no estado fresco por cada teor de mistura. Inicialmente, determinou-se o diâmetro de espalhamento das argamassas através do ensaio da mesa de consistência[14]. Em seguida, iniciou-se o ensaio de retenção de água[15].E por fim, para determinar a densidade da argamassa e a porcentagem de vazios presentes na mistura realizou-se o ensaio de teor de ar incorporado[16].

Para determinação das propriedades referente à resistência mecânica das argamassas os corpos de prova foram moldados e após 24 horas realizou-se a desforma, e logo depois, colocou-os submersos na água. Considerando as idades de 7, 14 e 28 dias, os CP's foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão[17]e resistência à tração por compressãodiametral[18].

3 | APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos agregados

Para a verificação da viabilidade da utilização do resíduo na produção de argamassas, os resultados da caracterização dos agregados miúdos estão expostos na Tabela 2. Verificou-se que devido ao DM, o resíduo e a areia foram classificados como areia grossa e areia média respectivamente. Vale ressaltar ainda que, os valores da caracterização do PP estudado se aproximaram dos dados do resíduo de Policloretode Vinila (PVC) analisados por Santos e Ferrari[19].

Propriedades	Método de Ensaio	Areia	PP	PVC Santos e Ferrari (2019)
Massa Unitária (g/cm³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,59	0,36	*
Massa Específica (g/cm³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62	0,95	0,55
Diâmetro Máximo (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,18	4,75	4,27
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,06	3,06	2,36
Absorção (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0,48	*	*

Tabela 2 – Resultado dos ensaios de caracterização

3.2 Propriedades no estado fresco

Pode-se observar na Figura 1, os resultados numéricos da consistência, onde é possível notar uma redução proporcional a incorporação de resíduos nas argamassas. A redução da consistência ocorreu, pois algumas partículas são angulares e outras têm formas irregulares, resultando na redução dos parâmetros de fluidez da argamassa[20,21].

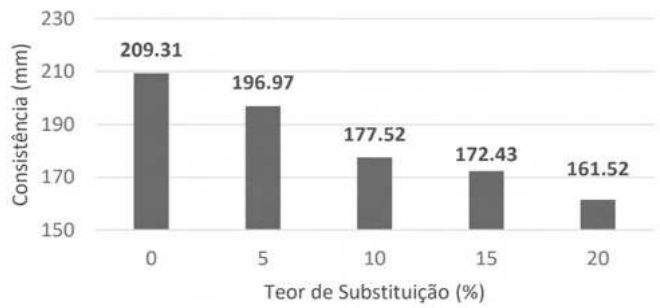


Figura 1 – Resultado do ensaio de consistência

Fonte: Autores

Com relação ao teor de ar incorporado das argamassas, percebe-se um aumentou à medida que o volume de agregado artificial foi adicionado, conforme representado pela Figura 2, ocasionando na diminuição da densidade de massa. Isso ocorreu porque a massa unitária do agregado artificial é inferior quando comparada à areia, ou seja, o comportamento dessas propriedades pode estar relacionado ao aumento da densidade de empacotamento dos agregados[22]. O aumento do teor de ar comentado ocorreu a partir da mistura de 15% recomenda-se um tratamento estatístico a fim de expressar que essa diferença não é tão significativa, o mesmo pode ser abordado sobre a densidade que reduziu somente a partir com 10% de substituição.

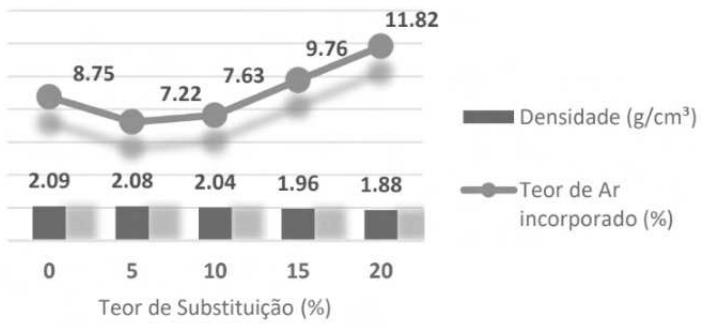


Figura 2 – Resultado do ensaio de teor de ar incorporado e densidade

Fonte: Autores

Com relação à retenção de água, os resultados não foram tão significativos, provavelmente devido a pouca quantidade de resíduo utilizado nos traços, tendo em vista que os valores numéricos nos traços não ultrapassaram 98%. Entretanto, um estudo realizado com polietileno de alta densidade[20], reduziu a retenção de água das argamassas devido o teor de finos também ter diminuído, entretanto esse comportamento não foi visualizado no presente trabalho.

3.3 Propriedades no estado endurecido

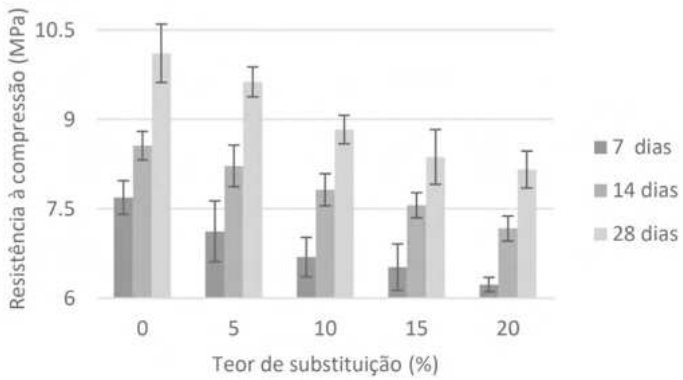


Figura 3 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão axial

Fonte: Autores

Os dados estatísticos dos resultados de resistência à compressão estão demonstrados na Figura 3. Verificou-se que em todas as idades houve uma diminuição na resistência à compressão das argamassas produzidas com o resíduo de polipropileno. Sendo que, nenhum dos traços com adição de PP apresentou-se superior ao de referência. Os resultados alcançados com os teores de 5% foram os mais elevados apresentando potencial para sua utilização em peças que conferem menores esforços mecânicos.

Sendo assim, vale ressaltar que redução da resistência à compressão axial é proveniente da fraca ligação entre as partículas de plástico e a pasta de cimento[23, 24]. Outros fatores a serem citados seriam o módulo de finura e o diâmetro máximo superiores do resíduo que acarretaram em altos índices de vazios e consequentemente reduziu a resistência mecânica das argamassas.

Na Figura 4 percebe-se que o aumento do volume de PP acarretou na redução da resistência à tração, esse comportamento é semelhante ao observado em alguns estudos[25, 26]. Uma das causas desse comportamento pode estar associada ao aumento de teor de ar incorporado ocasionado pelo resíduo triturado, aumentado assim a fragilidade das argamassas aos esforços mecânicos.

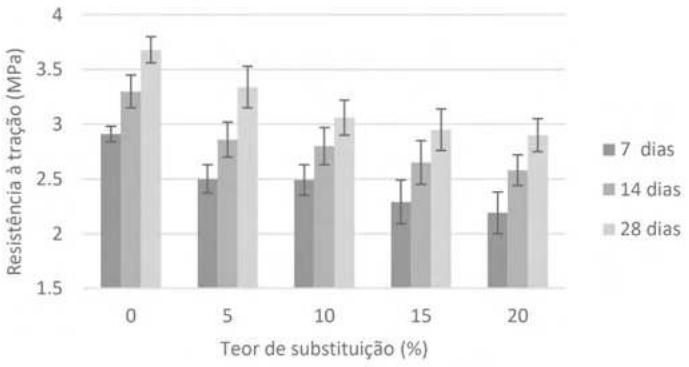


Figura 4 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Autores

4 | CONCLUSÕES

O resíduo triturado de polipropileno como agregado na produção de chapisco apresentou-se inviável devido a diminuição de consistência, sendo um fator primordial para sua aplicação em alvenaria, entretanto, é possível sua utilização como agregado leve em concretos e argamassas na produção de peças ou elementos não estruturais. Sendo assim, vale ressaltar que a inclusão desses materiais no cenário atual da construção civil tem grande importância para o desenvolvimento sustentável reduzindo a utilização desordenada do agregado mineral.

REFERÊNCIAS

1. GU, Lei; OZBAKKALOGLU, Togay, Use ofrecycledplastics in concrete: A critical review, **Waste Management**, v. 51, p. 19-42, 2016.

2. UNEP, Single-use plastics: A roadmap for sustainability. **United Nations Environment Programme**, 2018.

3. KAZA, Silpa et al. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. **World Bank Publications,** 2018.

4. JOHN, Vanderley Moacyr. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção – contribuição a metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

5. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Mercado: perspectivas para o setor de agregados**. São Paulo: ANEPAC, 2016. Disponível em: http://www.anepac.org.br/agregados/mercado. Acesso em: 12 junho. 2020.

6. ABDEL-SHAFY, Hussein I.; MANSUR, Mona S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, p. 1275-1290, Dec. 2018.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. ABNT NBR NM 52**: Determinação da densidadee da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

10. GARCIA, A. S.; CAMARGO, L. F. E.; SILVA, B. C. S.; SOUZA, G. T. Avaliação das propriedades no estado fresco de argamassas produzidas com resíduos de polipropileno (PP). **Technology Science**, v.2, n.1, p.66-72, 2020.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

12. WANKE, C. H.; BARBOSAI, L. G.; HÜBNER, J. V. M.; HOROWITZ, F.; MAULER, R. S.; OLIVEIRA, R. V. B. de. Recuperação Hidrofóbica de Polipropileno Tratado por VUV ou Plasma. **Polímeros**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 56–62, maio/jul. 2011.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 3a ed. Rio de Janeiro, 2016.

15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. 2a ed. Rio de Janeiro, 2005.

16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2 a ed. Rio de Janeiro, 2005.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2a ed. Rio de Janeiro, 2019.

18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Emenda 1. Rio de Janeiro, 2011.

19. SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 39-51, jul/set, 2019.

20. MELLO, A.L. **Utilização de resíduos de PEAD como alternativa aos agregados naturais em argamassa.** Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA, 2011, 172p.

21. SULE, Jibrin et al. Use of waste plastics in cement-based composite for lightweight concrete production. **Int J Res EngTechnol**, v. 2, n. 5, p. 44-54, 2017.

22. MOHAMMED, Azad A.; MOHAMMED, Ilham I.; MOHAMMED, Shuaaib A. Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. Construction and Building Materials, v. 201, p. 232-245, 2019.

23. JAIVIGNESH, B.;SOFI, A. Study on Mechanical Properties of Concrete Using Plastic Waste as an Aggregate, **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 8, n. 2, p. 132- 146, Jun. 2017.

24. MUSTAFA, Maher Al-Tayeb et al. Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. **In: Structures. Elsevier**, 2019. p. 519-526.

25. MANJUNATH, BT Ashwini. Partial replacement of e-plastic waste as coarse-aggregate in concrete. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 731-739, 2016.

26. HAGHIGHATNEJAD, Nikoo et al. Properties of recycled PVC aggregate concrete under different curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 943-950, 2016.



ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS UTILIZANDO RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE (DREGS E GRITS)

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081118

ALVARENGA; BRUNO MEDEIROS DE[1]; FALCÃO; JULIANE RODRIGUES[1]; TESSARO; ALESSANDRA BUSS[1]; MATTOS; FLÁVIA COSTA DE[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE (FURG).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: BR.M.ALVARENGA@GMAIL.COM

RESUMO: Este trabalho visa analisar traços de argamassas com a incorporação de resíduos provenientes da indústria de celulose (dregs e grits). A caracterização dos resíduos foi realizada através da difração de raios X, granulometria de difração a laser e microscopia eletrônica de varredura. Foi feita a substituição parcial do agregado miúdo no teor 10% e, aos 7, 14 e 28 dias de cura foram testadas as argamassas, com ensaios de resistência mecânica quanto à tração na flexão, compressão, capilaridade e retração. Os resultados apresentaram potencial de aproveitamento, tornando-se alternativa para grande extração de agregados naturais, propiciando uma redução nos impactos ambientais.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduos, celulose, argamassa, desempenho.

ABSTRACT: This paper aims to analyze mortar traces with the incorporation of residues from the cellulose industry (dregs and grits). The characterization of the residues was carried out through X-ray diffraction, laser diffraction granulometry, and scanning electron microscopy. The partial replacement of the aggregate at 10% content was carried out and, at 7, 14 and 28 days of cure, the mortars were tested, with mechanical resistance tests in terms of tensile strength in bending, compression, capillarity, and shrinkage. The results showed potential use, becoming an alternative for large extraction of natural aggregates, providing a reduction in environmental impacts.

KEYWORDS: Residues, cellulose, mortar, performance.

1 | INTRODUÇÃO

A indústria de celulose é um cenário em expansão no mundo nos últimos anos. Alguns países vêm adaptando processos que visam o aumento da produtividade e qualidade do produto, conciliada a práticas que preservem o meio ambiente. Hoje, o Brasil encontra-se como um dos principais países que trabalham com essa matéria prima, constituindo-se como um dos pilares da indústria nacional, devido principalmente a condições edafoclimáticas extremamente favoráveis. O processo de produção consiste na prática conhecida como *Kraft*, caracterizada pela ação de cozimento contínuo em suas etapas. Sua vantagem se encontra na possibilidade de recuperação dos produtos químicos utilizados durante a operação, contudo, o contraponto está no fato de gerar uma quantidade alta de resíduos sólidos, muitas vezes descartado ou utilizado na disposição de aterros. Visto isso, a fim de buscar a redução de custos, aumento da durabilidade e a consequente melhoria nos processos construtivos como um todo,

a área da construção civil vem buscando o desenvolvimento de novos materiais que atendam estas demandas, sem comprometer sua funcionalidade. Logo, o presente trabalho busca estudar a viabilidade de dois dos resíduos gerados no processo citado, sendo estes o dregs e o grits.

No cenário nacional, a produção anual de celulose está na ordem de 13 milhões de toneladas. Estima-se que há a geração de 780 mil toneladas de resíduos, sendo destes, 130 mil toneladas de dregs e 39 mil toneladas para grits[1], o que demonstra uma alta quantidade de material.

A geração do dregs se dá a partir da sedimentação de matéria inorgânica do licor preto, utilizado em etapas de tratamento químico da celulose, que acaba sofrendo dissolução e clarificação, resultando em sua formação. Deste processo, parte dela é líquida e essa fração é misturada com cal e, posteriormente, repassada à uma nova etapa de sedimentação, caracterizada pela formação do resíduo conhecido como Lama de Cal, que após uma porcentagem dela ser aquecida em fornalha, acaba dando origem ao grits.

Visto isso, o potencial uso destes resíduos como fração do material da produção de argamassas para uma edificação, resulta em uma alternativa interessante do ponto de vista sustentável, econômico e produtivo para a área da construção civil. Para isso, estes resíduos substituíram, individualmente, 10% do agregado miúdo (areia média) utilizado nas confecções das argamassas. Logo, será analisado o desempenho do dregs e do grits, em comparação com um traço de argamassa convencional que funcionará como referência no estudo.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, os resíduos foram obtidos por meio de uma indústria de papel e celulose localizada na região Sul do estado do Rio Grande do Sul, onde as amostras foram cedidas pela empresa, e estes foram armazenados e lacrados em sacos plásticos. As amostras dos resíduos foram secas em estufa à 110ºC e, posteriormente, maceradas com o auxílio de um almofariz. Na Figura 1 é possível ver uma amostra de grits e outra de dregs, respectivamente.



Figura 1 – Amostras de Grits e Dregs

Fonte: Elaborado pelos autores

A massa unitária foi determinada por meio do “Método C” estipulado pela

ABNT NBR NM 45:2006[2], em que a amostra deve ser despejada no recipiente de uma altura não superior a 50mm, retirando o excesso que eventualmente transbordará no processo.

A granulometria do agregado miúdo foi definida por ensaio de peneiramento com agitador mecânico, de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003[3], no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Já referente aos resíduos, estes, por sua vez, foram realizados ensaios de granulometria de difração a laser, visando uma análise mais completa na sua caracterização, com foco nas menores partículas.

O agregado natural utilizado apresentou massa unitária igual a 1,53 g/cm³ e módulo de finura de 2,45 caracterizando-o como areia média conforme Selmo[4]. Os resíduos apresentaram, em geral, granulometria fina. O dregs um material com coloração cinza escuro com alguns torrões e massa unitária de 0,86 g/cm³. Já o grits apresentou coloração cinza claro e massa unitária de 1,27 g/cm³. As curvas granulométricas dos materiais podem ser observadas na Figura 2.

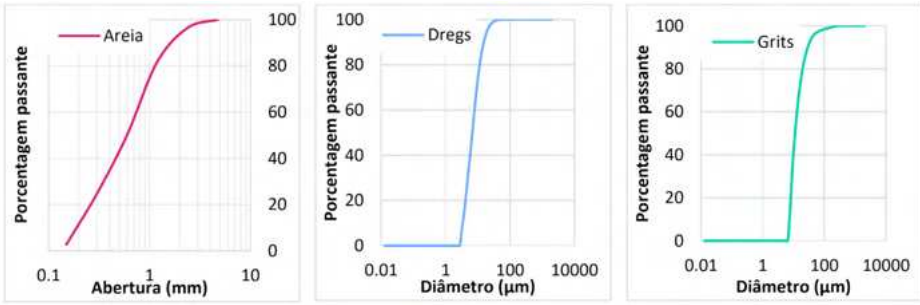


Figura 2 – Curvas granulométricas dos agregados

Fonte: Elaborado pelos autores

A análise da estrutura atômica e molecular dos resíduos foi feita por meio do Ensaio de Difração de Raios X (DRX), sendo os difratogramas registrados entre 3° e 90°, no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul – CEME-SUL da FURG, com o equipamento de difração de raios-X (DRX) da marca Bruker, modelo D8 Advance, com os seguintes parâmetros: voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, tubo de cobre (Cu) com comprimento de onda (λ): 1,5418Å. Resalta-se que foram utilizados como base os padrões difratométricos da ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database).* Através dos difratogramas, Figura 3, identifica-se que a principal fazer cristalina dos resíduos é o cálcio presente na forma de Calcita ($CaCO_3$).

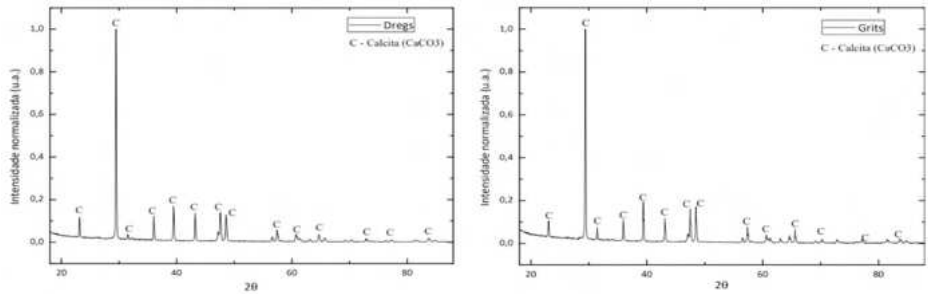


Figura 3 – Difratogramas dos resíduos

Fonte: Elaborado pelos autores

Além disso, foi realizada também a caracterização morfológica destes materiais utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde verifica-se partículas finas para o dregs e intermediárias para o grits corroborando com os resultados encontrados na granulometria de difração a laser apresentados na Figura 2. Nas imagens, verifica-se que ambos os resíduos são aglomerados de partículas menores, sendo essas características também ressaltadas por Ferreira et al.[5]. Na Figura 4 a seguir são apresentadas as micrografias, com aumento x80 e x10.000.

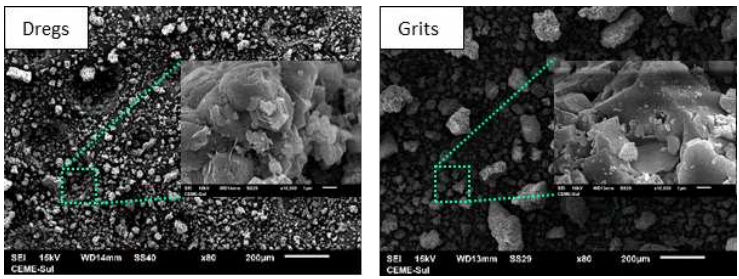


Figura 4 – Micrografias dos resíduos

Fonte: CEME-Sul/FURG

O traço utilizado respeitou a proporção de uma parte de aglomerante, cimento Portland CPV, para três partes de agregado miúdo (1:3), em massa. A quantidade de água foi experimentada até resultar em um valor que apresentasse trabalhabilidade adequada para uso geral na construção civil, através do ensaio de determinação do índice de consistência (IC) da argamassa, segundo as diretrizes da ABNT NBR 13276:2016[6]. Após este procedimento, fixou-se a relação água/cimento (0,69) para todos os traços, tendo em vista que esta relação permitiu obter o IC adequado para a argamassa de referência, conforme a Tabela 1.

Argamassa	Relações em massa (kg)						Densidade de massa (kg/m³)	Índice de consistência (mm)	Teor ar incorporado (%)
	A/C*	A/MS*	Cimento	Areia	Dregs	Grits			
Dregs	0,685	0,12	1	4,622	0,09	-	2131	230	5,56
Grits	0,691	0,12	1	4,622	-	0,132	1993	250	11,78
Referência	0,694	0,12	1	4,622	-	-	1938	248	14,11

*A/C- água/cimento; A/MS- água /materiais secos

Tabela 1 – Resumo das características das argamassas

Fonte: Os autores

Tendo o traço definido para os três tipos de argamassas estudados, foram moldados os corpos de provas prismáticos, quatro exemplares para cada traço analisado, com dimensões de 4x4x16cm, que serviram para aplicação de ensaios regulares, nos intervalos de tempo de 7, 14 e 28 dias. A cura foi realizada com as amostras envolvidas em filme de PVC até o momento dos ensaios.

A resistência mecânica foi determinada com os ensaios de tração na flexão e compressão, de acordo com a ABNT NBR 13279:2005[7]. Foram realizados também ensaios de absorção de água por capilaridade dos corpos de provas, conforme a ABNT NBR 15259:2005[8], bem como, ensaio de retração e densidade de massa das argamassas no estado endurecido, ABNT NBR 13280:2005[9].

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Densidade de massa no estado endurecido e retração

A Tabela 2 apresenta uma média dos resultados das densidades de massa no estado endurecido encontrados para as diferentes argamassas estudadas. Assim, nota-se que a argamassa com dregs apresentou maior densidade aos 28 dias de cura, como percebido também na densidade no estado fresco, justificando o baixo teor de ar incorporado em relação aos demais traços. Os resultados provenientes da substituição de grits indicou uma menor densidade de massa, semelhante a argamassa de referência. Verificou-se, também que os corpos de prova não apresentaram expressivas mudanças de dimensões, indicando que não houve retração na cura.

	Desforma (kg/m³)	3 dias (kg/cm³)	7 dias (kg/cm³)	14 dias (kg/m³)	28 dias (kg/m³)
Dregs	2100	2096	2092	2077	2063
Grits	2106	2101	2096	2080	2010
Referência	2111	2109	2093	2083	2017

Tabela 2 – Densidade de massa no estado endurecido

Fonte: Elaborado pelos autores

A densidade de massa aparente de todas as composições foi decrescente até os 28 dias de cura, como esperado, em razão da perda de água envolvida no processo químico. No entanto, a argamassa com dregs apresentou o percentual 1,8% de perda de massa neste processo e as demais 4,7%, indicando que, provavelmente, a relação a/c para esta composição foi insuficiente, justificada pela maior área superficial das partículas de dregs que demandam maior consumo de água. Segundo a ABNT 13281:2005[10], aos 28 dias, para a densidade de massa no estado endurecido todas as argamassas são classificadas como "M6" (> 1800 kg/m³).

3.2 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 5, encontram-se as médias dos valores do coeficiente de capilaridade dos corpos de prova, ensaiados no tempo de 90 minutos em 7 e 28 dias. Os corpos de prova com substituição parcial dos agregados por resíduos apresentaram um coeficiente de capilaridade maior em relação a argamassa de referência, mas semelhantes entre si ao final dos 28 dias de cura. Nota-se na argamassa com dregs um coeficiente de capilaridade na ordem de 44%, superior a argamassa de referência. Este fato pode estar relacionado a deficiência de água de amassamento, que propicia a transformação dos compostos químicos na hidratação da matriz cimentícia aliado ao processo de cura, em que as amostras ficaram condicionadas um filme de PVC dificultando a penetração do CO_2, inviabilizando a eficiente transformação dos hidróxidos em carbonatos de cálcio. Outro fator para o maior coeficiente de capilaridade dos compósitos com resíduos pode ser devido a porosidade e forma dos grãos. De acordo com a ABNT NBR 13281:2005[10] as argamassas com dregs e grits são classificadas como "C2" (1,0 a 2,5 g/dm².min$^{1/2}$) e a de referência como "C1" (≤ 1,5 g/dm².min$^{1/2}$).

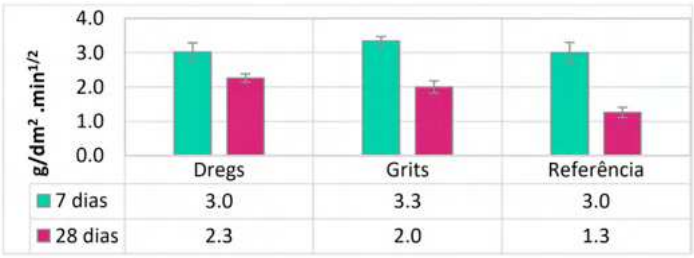


Figura 5 – Coeficiente de capilaridade

Fonte: Elaborado pelos autores

3.3 Resistência à tração na flexão e à compressão

Os resultados de resistência à tração na flexão evidenciaram um ganho de resistência acentuado nas argamassas que possuem substituição parcial do agregado miúdo por resíduo nas primeiras idades. Aos 7 dias, o traço com dregs apresentou um incremento de resistência, em relação ao traço de referência, de 27,3% para tração na flexão e 24,7% para compressão. Já o traço com grits apresentou um aumento de resistência para tração na flexão e compressão, respectivamente, na ordem de 21,3%

e 19,8%. Percebe-se aos 28 dias que as resistências dos corpos de prova à compressão apresentam resultados análogos e superiores as exigidas pela ABNT NBR 13281:2005[10], sendo as argamassas com dregs classificadas como "R5" (2,7 a 4,5 MPa), grits e referência como "R6" (> 3,5 MPa) para flexão. Já para a compressão todas foram classificadas como "P6" (> 8 MPa). A Figura 6 apresenta os resultados da resistência à tração na flexão e compressão das argamassas estudadas.

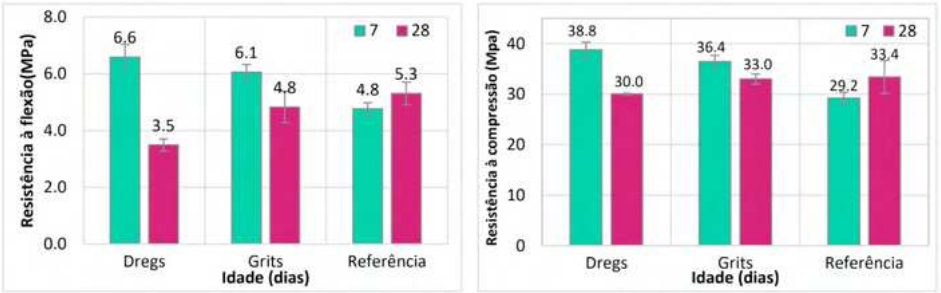


Figura 6 – Resistência à tração na flexão e à compressão

Fonte: Elaborado pelos autores

Além disso, associa-se a redução dos valores nas resistências à tração na flexão e compressão, ao modo em que foram mantidas até o momento do ensaio, ratificando o descrito no ensaio de absorção de água. Com isso, há a possibilidade de as amostras não terem completado o seu processo de cura, sendo assim não demonstrando todo seu potencial.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, foi realizado o estudo da substituição parcial dos agregados miúdos por resíduos de celulose (dregs e grits). Quanto as resistências, os corpos de prova com adição de resíduos apresentaram valores superiores, nas primeiras idades, aos da argamassa de referência, sendo maior o ganho de resistência da argamassa com adição de dregs.

Observa-se que os corpos de prova não indicaram retração na cura, ademais, em virtude do maior teor de finos, as argamassas com substituição parcial de dregs apresentaram um menor índice de consistência e uma maior densidade de massa no estado fresco. Salienta-se que os resultados apresentados nesse artigo são oriundos de uma pesquisa em desenvolvimento, por conseguinte, novas variáveis serão testadas, tais como: outros aglomerantes e diferentes processos de cura.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se o bom desempenho e viabilidade da utilização das argamassas com substituição de 10% de resíduos. Sendo essa, uma alternativa ao uso excessivo de agregados naturais, além de uma proposta para a gestão adequada desses resíduos amplamente produzidos.

REFERÊNCIAS

1. RIBEIRO, Alcidio. P. Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos. 2010. Tese de doutorado Escola Politécnica – Universidade de São Paulo,2010.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

4. SELMO, S. M. S. Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios. 1989. 227 f. Dissertação de Mestrado Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 1989.

5. FERREIRA, Lidia et al. Caracterização de resíduos da indústria de papel e celulose para o desenvolvimento de materiais cerâmicos. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica,61.,2017, Rio Grande do Sul. **Anais[...]** Rio Grande do Sul, 2017.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS MISTAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081119

HERMENEGILDO, GABRIELA C.[1]; CARNEIRO, GISELE O. P.[1]; NOGUEIRA, JÚLIA A. W.[1]; BEZERRA, AUGUSTO C.[2], BESSA, SOFIA A. L.[1];
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS / UFMG; [2] CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS/ CEFET-MG.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: GABHICARMO@GMAIL.COM

RESUMO: O estado de Minas Gerais é segundo maior produtor de minério de ferro do Brasil e em 2019, foi responsável por 39% da produção deste mineral do país. Este trabalho buscou avaliar a carbonatação e o potencial de captura de CO_2 em argamassas de revestimento mistas nos traços 1:2:9 e 1:1:6, produzidas com rejeito de minério de ferro (RMF), calcinado a 500 graus e in natura, em substituição ao cimento CP IV, nos teores de 0%, 10% e 20%. Para isso, foram realizados ensaios mecânicos e de carbonatação natural. Os resultados indicam a viabilidade da incorporação do RMF em argamassas sem prejuízo para a sua durabilidade.

PALAVRAS-CHAVES: Carbonatação, rejeito de minério de ferro, argamassas.

ABSTRACT: The state of Minas Gerais is the second largest iron ore producer in Brazil and in 2019, it was responsible for 39% of the country's iron ore production. This work aimed to evaluate carbonation and CO_2 capture potential in mixed coating mortars, in 1:2:9 and 1:1:6 mixes, produced with iron ore tailings (IOT), calcined at 500 degrees and in natura, in replacement of cement CP IV, at levels of 0%, 10% and 20%. For this, mechanical and natural carbonation tests were carried out. The results indicate the feasibility of incorporating IOT into mortars without harming their durability.

KEYWORDS: Carbonation, iron ore tailings, mortars.

1 | INTRODUÇÃO

Desde seu início, em meados do século XVII, a mineração tem contribuído de modo significativo para o desenvolvimento do país e, até hoje, a indústria mineral se destaca por auxiliar de forma direta a balança comercial brasileira [1]. No primeiro semestre de 2019, a participação de minério de ferro correspondeu a 64,8% das exportações da Indústria Extrativa Mineral. No ano seguinte, os estados com as maiores arrecadações de Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) foram: Pará (51%) e Minas Gerais (39%), os maiores produtores de minério de ferro do país. [2].

A extração mineral gera grande volume de resíduos e seu armazenamento, além de dispendioso, gera significativo passivo ambiental e risco elevado de acidentes, como o que ocorreu em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambas cidades de Minas Gerais

[3]. A demanda de grandes áreas para sua deposição, o potencial de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos de ruptura e falha nas barragens capazes de provocar danos ambientais e sociais são alguns dos problemas associados à extração do minério de ferro, fato que torna a destinação adequada dos rejeitos uma demanda cada vez mais urgente.

Como exemplo de viabilidade, a China tem buscado modificar o modelo linear de produção (take, made and dispose) e utilizar 20% dos rejeitos de mineração na construção civil [4]. Recentemente, a lei 23.575, de 15 de janeiro de 2020 (que alterou a lei 6.763, de 26 de dezembro de 1975) autorizou o Poder Executivo de Minas Gerais a zerar a carga tributária incidente em obras de cimento e concreto em que haja emprego de rejeito ou estéril de minério. Essas ações, que partem do Poder Público, são grandes viabilizadoras do uso de rejeitos e estéreis nos materiais e nos componentes da construção, sem as quais o esforço dos pesquisadores não conseguiria alcançar o real emprego desses resíduos pela sociedade [1].

Em um segundo plano, tem-se a indústria cimenteira, que é responsável por aproximadamente 7% das emissões antropogênicas globais de CO_2. O cimento é o principal componente de concretos e argamassas, cerca de 90% de todo o cimento produzido no Brasil é empregado nestes materiais, sendo 35% destinados à produção de concretos e 55% a produção de argamassas, sendo o restante (10%) é empregado para outros usos. A fim de reduzir suas emissões, este setor tem buscado melhorar a eficiência energética, reduzir o teor de clínquer contido no cimento e implementar técnicas de estocagem e captura de carbono [5].

A captura de CO_2 em materiais cimentícios, como argamassas e concretos, ocorre devido à reação química de carbonatação, ao longo de sua vida útil ou após a demolição da edificação/estrutura [6]. A carbonatação é um fenômeno que ocorre entre a portlandita (hidróxido de cálcio – CH) e o CO_2 presente no ar. Tal reação depende diretamente da porosidade, da umidade relativa do ar, da concentração de CO_2, da pressão de penetração e da temperatura do meio ambiente [7-8].

Neste sentido, o presente estudo objetiva avaliar as propriedades mecânicas e a profundidade da carbonatação em argamassas de revestimento mistas, nas quais o cimento é substituído por rejeito de minério de ferro (RMF).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, avaliou-se as propriedades mecânicas e a carbonatação de argamassas mistas de revestimento. Para a produção das argamassas foram utilizados: i) cimento Portland Pozolânico, tipo CP IV 32; ii) rejeito de minério de ferro (RMF); iii) areia fina lavada; e iv) cal hidratada CH-I.

Os traços 1:2:9 (G1), e 1:1:6 (G2), em massa (cimento: cal: areia), foram escolhidos por serem os mais comumente utilizados em rebocos interno e externo, respectivamente [9; 10; 11].

O rejeito de minério de ferro (RMF), utilizado em substituição parcial ao cimento, foi fornecido pela Vallourec Mineração, em seu estado *in natura* e calcinado a 500 °C (em forno rotativo). Todas as amostras de RMF foram secas em estufa a 100 ºC por 24h e, posteriormente, cominuídas em moinho planetário de alto desempenho, com quatro

recipientes de moagem (FRITSCH, modelo Pulverisette 5). Os recipientes e as esferas utilizadas são compostos por óxido de Zircônio, 94,2% ZrO_2, com densidade de 5,7 g/cm³.

O agregado miúdo utilizado foi a areia média lavada e peneirada, disponível na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. As amostras foram caracterizadas quanto à sua granulometria, NBR NM 248 [13]. Para tal, a areia foi seca em estufa por 24h.

Os teores de substituição utilizados (0%, 10% e 20%), foram definidos em estudos anteriores [10; 11; 12], assim como o fator água/aglomerante de todas as argamassas, que foi fixado em 0,95. Foram moldados traços de referência sem resíduo e com substituição, em massa, do cimento por RMF, conforme Tabela 1.

Para os ensaios de resistência à compressão e à tração, conforme ABNT NBR 13279/2005 [14], foram moldados para cada grupo quatro corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x160 mm. Os prismas foram rompidos, aos 28 dias, em uma Máquina Universal de Ensaio Emic DL30000N.

Os valores da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram aferidos aos 28 dias, segundo ABNT NBR 9778/ 2005 [14]. Para cada grupo foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Figura 1).

Para o ensaio de carbonatação, foram utilizados corpos de prova cilíndricos que permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de 120 dias. A umidade relativa de 65 ± 1% foi adotada como parâmetro. Nas datas do ensaio, as amostras foram submetidas à ruptura diametral e aplicação de uma solução de 1% de fenolftaleína diluída em álcool isopropílico e água destilada foi aspergida nas superfícies, segundo especificação da RILEM CPC-18 [17].

Tipo de resíduo	Argamassas	G1 – 1:2:9				G2 – 1:1:6			
		Cimento	Cal	Areia	RMF	Cimento	Cal	Areia	RMF
Sem resíduo	REF	1	2	9	-	1	1	6	-
RMF *in natura*	IN-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	IN-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2
RMF 500 °C	500-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	500-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2

Tabela 1 – Traços das argamassas

Fonte: Autores, 2021



Figura 1 – Corpo de prova de argamassa - ensaio da NBR 9778/2005

Fonte: Autores, 2021

Nessas condições, o hidróxido de cálcio (CH) adquire uma tonalidade vermelho-púrpura (componente básico, pH > 8,0), enquanto a parte que sofreu carbonatação e que, consequentemente, absorve CO2 (componente ácido, pH < 8,0) permanece incolor [18]. Existe ainda uma região na fronteira das duas onde a carbonatação já está em andamento e que este ensaio não é capaz de indentificar, denominada zona parcialmente carbonatada ou zona semi-carbonatada, como pode ser visto na Figura 2.

Após a aspersão da solução de fenolftaleína, aguardou-se 10 minutos para a secagem das amostras para então prosseguir com a análise do ensaio. A análise da área carbonatada foi realizada com o auxílio do *software* AutoCAD 2019® [8].

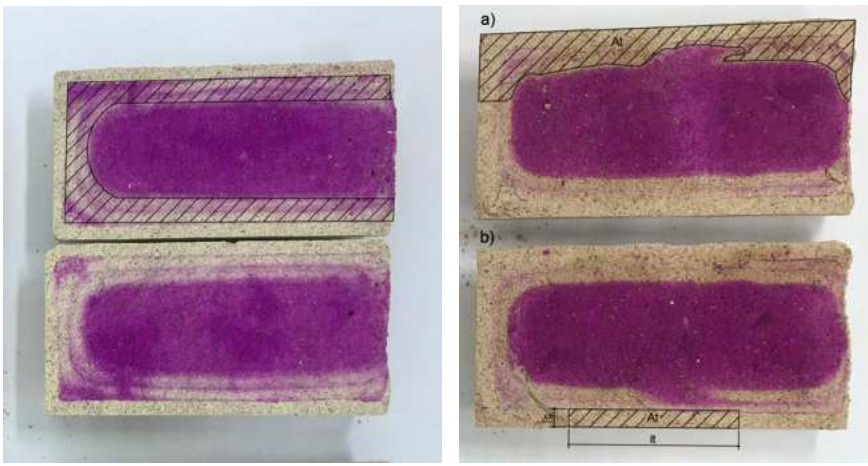


Figura 2 – Zona semi-carbonatada não mensurável nos cálculos (esq.); Análise gráfica da área carbonatada. a) Delimitação da área; b) Penetração média de carbonatação (dir.)

Fonte: Autores, 2021

As escalas foram ajustadas para o tamanho real, o que permitiu a delimitação gráfica da área incolor que indica a área carbonatada. Com o software, é possível medir a área total através do método de Gauss, que consiste em um algoritmo matemático que calcula a área de polígonos irregulares [8]. Logo, dividindo-se a área total (At) pelo comprimento (lt), Figura 2-a, é possível obter a penetração média de carbonatação (lc) conforme é mostrado na Figura 2-b. Foram rompidas quatro amostras para cada tipo de argamassa. Por meio dessa metodologia, cada corpo de prova rompido gerou seis medidas do perfil de penetração de CO_2.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios de resistência à tração são apresentados na Figura 3. Observa-se uma tendência na diminuição da resistência à flexão com o aumento do teor de RMF na argamassa. De modo geral, os resultados não interferem na classificação das argamassas como R1, segundo ABNT NBR 13281/ 2005 [19] e são aptas a serem utilizadas como argamassas de revestimento interno.

A Figura 4 apresenta os valores de resistência média à compressão aos 28 dias. Assim como nas análises referentes à flexão, com o aumento do teor de RMF na argamassa, nota-se uma tendência na redução dos valores de resistência à compressão. No caso do traço G1 (1:1:6), as argamassas se mantêm na classificação como P1 [19], quanto ao traço G2 (1:2:9), argamassas podem ser classificadas como P3 [19].

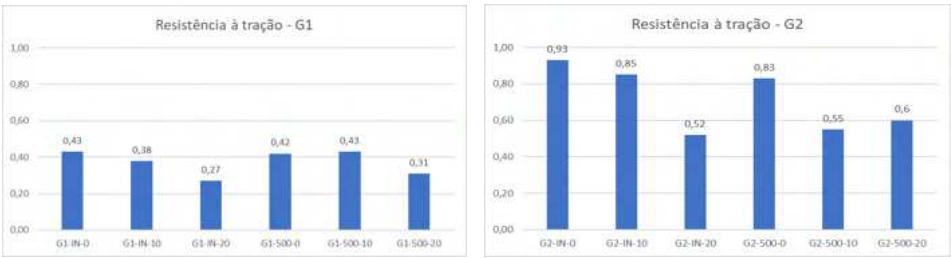


Figura 3 - Resultados de resistência à tração das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Fonte: Autores, 2021

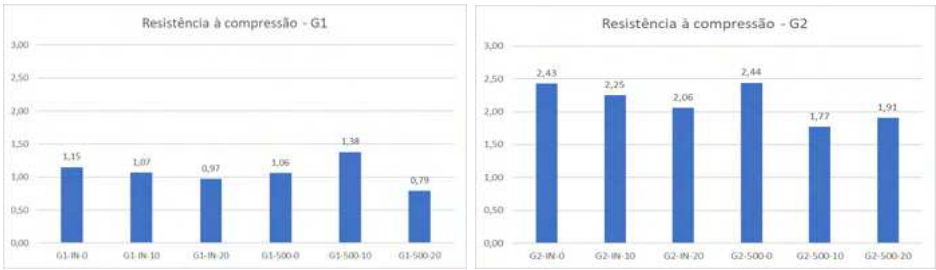


Figura 4 - Resultados de resistência à compressão das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Fonte: Autores, 2021

Os resultados do ensaio de absorção de água, através dos índices de vazios, massas específicas e índices de absorção revelaram que as substituições de cimento por RMF não alteraram significativamente os valores obtidos, comparados à argamassa de referência (Figuras 5 e 6).

Os resultados referentes ao ensaio de carbonatação natural, aos 120 dias, das argamassas estão expressos nas Tabelas 2 e 3. A geometria das amostras influencia nas frentes de carbonatação, amostras cilíndricas elevam a profundidade em aproximadamente 50% quando comparadas a amostras prismáticas [16]. O motivo pode ser devido a maior soma dos vetores de difusão nas amostras cilíndricas [8].

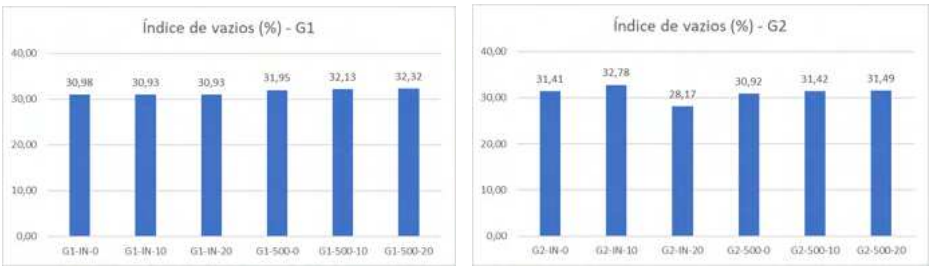


Figura 5 - Resultados do índice de vazios das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Fonte: Autores, 2021

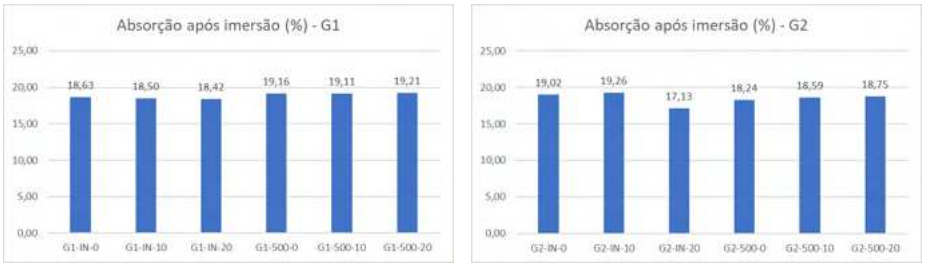


Figura 6 - Resultados da absorção de água das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Parâmetros	G1 IN 0	G1 IN 10	G1 IN 20	G1 500 0	G1 500 10	G1 500 20
Média (mm)	5,03	4,86	4,15	4,69	4,90	5,67
Desvio padrão	1,09	1,11	1,06	0,78	0,85	1,13
CV (%)	21,64	22,81	25,45	16,61	17,28	19,94

Tabela 2 – Profundidade de carbonatação – G1

Fonte: Autores, 2021

Parâmetros	G2 IN 0	G2 IN 10	G2 IN 20	G2 500 0	G2 500 10	G2 500 20
Média (mm)	5,47	5,16	4,95	5,06	5,69	5,83
Desvio padrão	1,28	1,31	1,14	1,00	0,89	0,86
CV (%)	23,38	25,44	23,08	19,77	15,66	14,67

Tabela 3 – Profundidade de carbonatação – G2

Fonte: Autores, 2021

De modo geral, há uma tendência a diminuição da frente de carbonatação quando o rejeito se encontra in natura, e inversamente a esse fato, há uma tendência de aumento na profundidade de carbonatação quando o rejeito está calcinado a 500 ˚C. Essa tendência de aumento das propriedades da argamassa nas amostras calcinadas, também pode ser observada no que se refere ao ensaio de absorção, onde os índices de vazios e absorção se elevam para as amostras do grupo G1 calcinadas a 500 ˚C.

Como a carbonatação de argamassas que levam cal na sua composição é uma propriedade até mesmo esperada (e positiva, num cenário de captura de carbono pelos materiais de construção), pode-se considerar que o uso de RMF como substituto do cimento Portland não interferiu, de forma preponderante, nos valores de carbonatação observados [6, 20].

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos ensaios realizados, percebe-se que a substituição do cimento Portland pelo RMF não afetou as propriedades mecânicas e a durabilidade, mensurada pelo ensaio de carbonatação. Essa conclusão é possível já que há uma tendência de que as argamassas produzidas com RMF apresentem carbonatação semelhante às argamassas de referência, logo as propriedades das argamassas também não sofrem relativas alterações.

REFERÊNCIAS

1. MIRANDA, M.A.; ARRUDA, E.A.M., Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos. Revista Matéria, v.00, n.0, 2020. (No prelo).

2. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM. Arrecadação CFEM por ano. Brasília, Brasil, outubro de 2020. Disponível em:< anm.gov.br>. Acesso em abril de 2021.

3. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM, *Relatório Anual de Atividades.* Julho de 2018-junho de 2019. Disponível em:<http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anaul-2018-2019.pdf/. Acesso em abril de 2021.

4. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais, SEMAD, "**Mineiros conhecem modelo chinês de economia circular na mineração**". Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/3704-mineiros-conhecem-modelo-chines-de-economia-circular-na-mineracao>. Acesso em maio de 2021.

5. JOHN, V. M. et al. Potencial de mitigação de CO_2 de materiais cimentícios. SINIC e ABCP. São Paulo: [s.n.], 2018 (não publicado).

6. MAZURANA, L. **Captura de CO_2 em argamassa de revestimento através da carbonatação natural** / Lissandra Mazurana – 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2019.

7. LIMA, S. A.; SALES, A., ALMEIDA, F. C. R., et al., "Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão", *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 201-212, Abr./jun. 2011.

8. LADEIRA, L. O. **Resistência à tração e à carbonatação de argamassas fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer.** Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte., 2017.

9. DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre.** 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

10. BESSA, S.; MENDONÇA, I.; VIMIEIRO, J.; GURGEL, G.; MAGALHÃES, L.; BEZERRA, A.; LOURA, R. Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

11. MENDONÇA, I. K. ; VIMIEIRO, J. I. C. ; BELO, B. R. ; LOURA, R. M. ; Bessa, S. A. L. ; BEZERRA, A. C. S. . Absortância solar de argamassas coloridas produzidas com rejeito de minério de ferro. In: VI Congresso de Engenharia Civil, 2019, Juiz de Fora. **Anais do VI CONENGE**. Juiz de Fora: UFJF, 2019.

12. MORAIS, C. F.; BELO, B. R.; BEZERRA, A. C. S.; PORTO, M. P.; LOURA, R. M.; BESSA, S. A. L. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121073, 2021.

13. ABNT. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

14. ABNT. **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.

15. ABNT. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

16. KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

17. RILEM. **CPC 18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth.** TC56 - MHM Hydrocarbon Materials, 1998. ISSN 0025-5432/88.

18. NEVES, I. B. F. Avaliação da carbonatação em argamassas de cimento com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina. Dissertação de Mestrado - UnB. Brasília, 2005.

19. ABNT. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

20. COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta. **Matéria** (Rio de Janeiro) [online]. 2018, v. 23, n. 1. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0286>.



EFEITO DE UMA RESINA POLIMÉRICA NA ABSORÇÃO DE PEDRAS ARTIFICIAIS DE CALCÁRIO LAMINADO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081120

BEZERRA; ANA KAROLINY LEMOS[1]; SILVA; LEONÁRIA ARAÚJO[1]; ARAÚJO; LUCAS BENÍCIO RODRIGUES[1]; CABRAL; ANTONIO EDUARDO BEZERRA[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ANAKAROLINYLEMOS@ALU.UFC.BR

RESUMO: A exploração do calcário laminado do Cariri cearense gera uma grande quantidade de resíduos, sendo necessárias alternativas para a utilização desse material. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da utilização de uma resina de poliéster na absorção de pedras artificiais produzidas com o resíduo do calcário laminado. Para isso, o resíduo foi caracterizado e foram confeccionadas pedras artificiais. Em seguida, foi analisada a absorção de água dessas placas e das comerciais. Percebeu-se que as placas artificiais são mais resistentes à ação da água.

PALAVRAS-CHAVES: Pedra Cariri, Resina polimérica, Pedra artificial.

ABSTRACT: The exploration of the laminated limestone of Cariri from Ceará generates a large amount of waste, requiring alternatives to the use of this material. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of the use of a polyester resin on the absorption of artificial stones produced with the residue of laminated limestone. For this purpose, the waste was characterized and artificial stones were made. Then, the water absorption of these boards and commercial ones was analyzed. It was noticed that artificial boards are more resistant to the action of water.

KEYWORDS: Cariri Stone, Polymeric resin, Artificial stone.

1 | INTRODUÇÃO

A exploração para fins ornamentais e de revestimento do calcário laminado do Cariri cearense, especificamente nas cidades de Santana do Cariri e Nova Olinda, é uma das atividades ligadas à construção civil que gera uma grande quantidade de resíduos. De acordo com Vidal et al. (2008), a produção de Pedra Cariri chega a ser em média de 80 mil toneladas por ano e o processo de fabricação das peças gera um desperdício de 70% do total explorado. Silva et al. (2008) indicaram que os volumes das partículas de maior tamanho, àquela época, eram de 755.000 m³ e 275.000 m³ em Nova Olinda e Santana do Cariri, respectivamente, o que representa um total de 2,9 milhões de toneladas de Resíduos de Pedra Cariri (RPC). Já Bastos (2014) estimou que a quantidade de RPC gerado fosse de cerca de 850 toneladas/ano.

Esses resíduos são descartados em locais inadequados, provocando danos ao meio ambiente e dificultando o avanço da lavra. Além disso, os efluentes líquidos gerados com o pó da serragem provocam o assoreamento dos riachos existentes

no entorno das serrarias e prejudicam a cobertura do solo, danificando a vegetação (MENEZES et al., 2010).

Moura et al. (2013); Menezes et al. (2010) e Silva et al. (2008) já avaliaram o uso do Resíduo de Pedra Cariri, e identificaram que este material pode ser aproveitado como matéria-prima na produção de cimento, concreto, blocos cerâmicos e argamassas. No entanto, não se observam pesquisas sobre o emprego de RPC na fabricação de pedras artificiais. Essas pedras podem ser formadas por um alto teor de agregados naturais, como mármore, granito, areia de quartzo, cristais de vidro, e um baixo teor de material polimérico em sua composição, apresentando melhores propriedades mecânicas e baixa porosidade, em comparação às pedras naturais (RIBEIRO, 2015).

Dados da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2018) mostram que, no Brasil, a produção e as exportações de materiais rochosos artificiais ainda são pouco relevantes. Em contrapartida, as importações brasileiras desses materiais são significativas. No 1º semestre de 2018, as importações de materiais rochosos artificiais totalizaram 31,2 mil t (US$ 21,8 milhões), enquanto as exportações desses materiais, no mesmo período, atingiram apenas 2.964,7 t (US$ 1,7 milhão). Assim, estudos voltados para a nacionalização da produção de pedras artificiais tornam-se relevantes a fim de inverter esse cenário e de proporcionar preços mais acessíveis ao produto nacional.

Portanto, visando alinhar a redução do impacto ambiental causado pela construção civil e a nacionalização da produção de pedras artificiais, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da utilização de uma resina de poliéster na absorção de pedras artificiais produzidas com o resíduo do calcário laminado (Pedra Cariri), de modo que apresentasse potencial técnico para ser utilizada como revestimento na construção civil.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizados dois tipos de resíduo do beneficiamento da Pedra Cariri: pó e aparas de chapas, exemplificadas na Figura 1, coletados de uma pedreira localizada no município de Nova Olinda – CE.



Figura 1 - Apara de chapa
Fonte: Autores (2021)

As aparas de chapas foram trituradas em uma triturador mecânico (moinho de mandíbulas) e peneiradas nas peneiras com abertura de 12,5 mm; 4,75 mm e 0,15 mm, já o pó foi peneirado apenas na peneira com abertura de 0,15 mm, sendo utilizado o material passante. Dessa forma, foram utilizadas três faixas granulométricas: material passante na peneira de 12,5 mm e retido na de 4,75 (agregado graúdo); passante na peneira de 4,75 mm e retido na de 0,15 mm (agregado miúdo) e passante na peneira de 0,15 mm (pó).

A resina utilizada foi a de poliéster insaturada ortoftálica cristal da marca FORTCOM 6100, disponível no mercado local e com menor custo em relação às outras resinas. Por recomendação do fabricante, foi utilizado como ativador de cura o peróxido de MEKP – Peróxido de Metil Etil Cetona (líquido) na proporção de 1% em relação à resina. Na Tabela 1 são mostradas as propriedades da resina no seu estado líquido e após a sua cura.

Propriedades	Valores	Propriedades	Valores
Viscosidade sp3/12 RPM (cP)	1100-1600	Intervalo de pico (minutos)	15-25
Teor de Sólidos (%)	64	Pico exotérmico (°C)	130-180
Densidade (g/cm³)	1,10-1,12	Resistência máxima (MPa)	55
Tempo de Gel (minutos)	9-14	Módulo de Elasticidade (GPa)	1,9
Resistência à Flexão (MPa)	80		

Tabela 1- Propriedades da resina poliéster insaturada ortoftálica cristal

Fonte: Fabricante da resina (2021)

A pedra comercial (Figura 2) utilizada como material comparativo em relação às propriedades das pedras artificiais é proveniente da mesma empresa de onde o resíduo foi coletado.



Figura 2 – Pedra Comercial

Fonte: Autores (2021)

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização do resíduo da Pedra Cariri

A caracterização do resíduo da Pedra Cariri se deu a partir da análise granulométrica, do ensaio de massa específica dos grãos e do ensaio de absorção de água. Quanto à avaliação da resistência à abrasão Los Angeles do resíduo, outros autores já encontraram valores superiores a 60%, indicando que o material não possui boa resistência ao desgaste por atrito (OLIVEIRA, 2016; ASSIS E MELLO, 2014).

A determinação da granulometria do resíduo foi realizada pelo método do peneiramento, de acordo com a norma técnica ABNT NBR NM 248/2003 que estabelece o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos.

A massa específica do resíduo e a absorção de água dos agregados graúdos foram determinadas de acordo com a norma ABNT NBR NM 53/2009. Já a absorção de água dos agregados miúdos foi obtida a partir da norma ABNT NBR NM 52/2009.

2.2.2 Produção das Placas

Com auxílio do software EMMA (Elkem Materials Mixture Analyzer), foi feito um empacotamento das partículas para a obtenção das porcentagens das faixas granulométricas que proporcionaram um menor índice de vazios. Após definição dessas porcentagens, foram realizados 8 testes variando-se a quantidade de resina e a de resíduo. Dessa forma, definiu-se que seriam utilizados 25% de resina e 75% de resíduo, em volume, sendo, desses 75%, 30% de agregado graúdo, 40% de agregado miúdo e 30% de filer. Assim, foram produzidas 20 placas de pedra artificial em moldes de tamanhos de 155 x 135 x 20 mm.

A preparação dos compósitos (Figura 3) ocorreu da seguinte forma: (1) inicialmente misturaram-se manualmente, em um recipiente, o acionador de cura MEKP e a resina; (2) adicionou-se o resíduo de RPC à mistura; (3) misturaram-se manualmente os três elementos até se notar a total umectação das partículas do resíduo; (4) colocou-se a mistura no molde com tampa; (5) Levou-se o molde até uma prensa e aplicou-se uma tensão compressiva de 0.8 MPa, em média, até que a placa atingisse a espessura desejada; (6) retirou-se o molde da prensa e colocou-se na estufa por 2h a 80°C para garantir a completa cura da resina e para a retirada de umidade remanescente, o que proporciona aumento das forças intermoleculares; (7) por fim, deixou-se as placas à temperatura ambiente para o resfriamento, para só então serem cortadas nos tamanhos dos corpos de prova dos ensaios. A Figura 4 mostra o produto final obtido.



Figura 3 – Produção das placas

Fonte: Autores (2021)



Figura 4 – Pedra comercial

Fonte: Autores (2021)

2.2.3 Absorção de água das placas artificiais e comerciais

A Pedra Cariri tem seu uso principalmente em revestimentos e pisos externos. Nesta pesquisa, foi avaliada a absorção de água das pedras artificiais e comerciais, para fins comparativos, que foi determinada de acordo com a ABNT NBR 13818/1997, sendo utilizados cinco corpos de prova de cada tipo de placa, com dimensões de 155x135x20 mm.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Caracterização do resíduo da Pedra Cariri

A Figura 2 mostra a curva granulométrica do resíduo da Pedra Cariri utilizado. Percebe-se que existe uma quantidade significativa de materiais finos (diâmetro inferior a 0,15 mm), o que pode proporcionar uma destinação adequada a uma das parcelas mais representativas do resíduo: o pó. Além disso, materiais com essa composição tendem a não apresentar regiões com escassez ou aglomerados de partículas, possuindo uma distribuição mais homogênea (RIBEIRO, 2015).

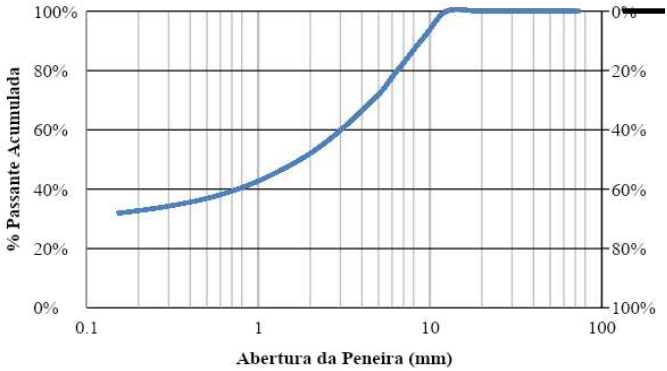


Figura 2 - Curva Granulométrica

Fonte: Autores (2021)

Assim como Farias (2017) e Moura (2013), o valor encontrado para a massa específica do resíduo de Pedra Cariri nesta pesquisa foi de 2,67g/cm³. Pinto (2011) encontrou 2,66 g/cm³ para a massa específica.

A absorção do agregado graúdo foi de 5,86% e do agregado miúdo de 6,41%. A explicação para essa alta absorção se deve ao fato de que as rochas sedimentares, em particular os calcários laminados, são materiais porosos (OLIVEIRA ,2016). Essa alta absorção pode ter contribuído para o aumento da quantidade de resina. Oliveira (2016) encontrou em média valores de 5,4% para a fração graúda e de 9,7% para a sua fração miúda. Já Pinto (2011) encontrou um valor de 7,7%.

3.2 Absorção de água das placas artificiais e comerciais

A absorção de água da pedra artificial do resíduo da Pedra Cariri apresentou um valor médio de 0,99% com coeficiente de variação de 38,12%, enquanto a pedra comercial obteve uma absorção de 5,20% (coeficiente de variação de 7,68%), ou seja, aproximadamente, 5 vezes superior ao da pedra artificial. Essa diferença nos valores pode estar associada à substituição do resíduo, material que apresenta um alto índice de absorção de água, pela resina, material com absorção praticamente nula (SANCHEZ et al., 2010). Possivelmente, o alto coeficiente de variação encontrado para as pedras artificais se deu devido ao tipo de processo produtivo das placas, porém todas as amostras apresentaram valores inferiores a 1,5%.

4 | CONCLUSÃO

Este primeiro trabalho experimental mostrou que a absorção de água das pedras artificiais produzidas com resíduo de Pedra Cariri e resina poliéster foi bem inferior à das comerciais, sendo que esta propriedade está diretamente correlacionada com a resistência que os grãos podem possuir, pois ao absorverem água o material pode facilmente ser quebrado ao sofrer impactos. Porém, torna-se necessária a realização de

novos ensaios para verificação de outras propriedades. Além disso, vale ressaltar que a baixa porcentagem de resina utilizada influencia de forma positiva no valor final da pedra artificial, já que é o material que apresenta o maior custo.

REFERÊNCIAS

1. ASSIS, S. R. H.; MELO, R. A. **Uso de calcário como agregado miúdo e fíler em misturas asfálticas**. 2014. In: XXVIII ANPET -Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Curitiba. Anais do XXVIII ANPET, 2014.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Informe 03/2018 - **Balanço das exportações, importações, produção e consumo interno brasileiro de rochas ornamentais no primeiro trimestre de 2018**. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, 2018. Disponível em: < http://abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2018/01/Informe_03_2018_Balan%C3%A7o_1%C2%BA_Semestre.pdf>. Acessado em 17 de abril de 2020.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13818**. Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

7. BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais**. 2014. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia. Feira de Santana, 2014.

8. FARIAS, U. M. S. M. **Produção de Concreto Autoadensável com uso de fíler calcário de resíduo de serragem de pedra Cariri**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2017.

9. MENEZES, R. R. et al. **Reciclagem do resíduo da serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos**. Rem: Rev. Esc. Minas, 2010. v.63, n.4, p.667-672.

10. MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais**. Ambiente Construído, 2013. v. 13, n. 1, p. 07-24.

11. OLIVEIRA, D. B. **O uso do resíduo pedra cariri como material alternativo para aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2016. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 2016.

12. PINTO, S. L. **Utilização de rejeito da extração e mineração de calcário laminado como material para as camadas granulares de um pavimento flexível**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2011.

13. RIBEIRO, C. E. G. **Desenvolvimento de um mármore artificial alternativo com resíduo da indústria de mármore e poliéster insaturado**. 2015. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ, 2015.

14. SANCHEZ, E. M. S.; CAVANI, C. S.; LEAL, C. V.; SANCHEZ, C. G. **Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades**. Artigo Técnico Científico - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. São Carlos: Polímeros, 2010. v.20 n.3.

15. SILVA, A. D. A. et al. **Aproveitamento de rejeito de calcário do cariri cearense na formulação de argamassa**. Anais do III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais e VI Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, Natal – RN, 15-18 novembro, 2008.

16. VIDAL, F. W. H.; FERNANDES, T. W. G.; PEQUENO, D. A.C. **Inovação tecnológica para a valorização da Pedra Cariri, CE**. IN: Congresso brasileiro de rochas ornamentais, Natal. Anais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 299-306.

CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) GERADA EM LEITO FLUIDIZADO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081121

PAGLIARIN; KARINE[1]; JORDANI; BÁRBARA[1]; KOPPE; ANGÉLICA[2]
[1]UNIFTEC CENTRO UNIVERSITÁRIO; [2]UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: KARINE.PAGLIARIN15@HOTMAIL.COM

RESUMO: A cinza de casca de arroz (CCA), resíduo agroindustrial, vem sendo estudada como alternativa na substituição do cimento Portland por possuir propriedade pozolânica. Neste sentido, foi realizada a caracterização química, física e microestrutural de uma CCA do sul do Brasil com o objetivo de conhecer as propriedades da CCA gerada em leito fluidizado. As análises revelaram que a CCA gerada através de reator de leito fluidizado é uma pozolana, pois apresentam teores de 94,40% de SiO_2. Dessa forma, apresenta potencial de substituição ao cimento Portland, uma alternativa à indústria da construção que busca novos materiais objetivando a preservação da natureza.

PALAVRAS-CHAVES: CCA, propriedades, pozolana, leito fluidizado.

ABSTRACT: Rice husk ash (RHA), an agro-industrial waste, has been studied as an alternative to replace Portland cement because it has pozzolanic property. In this sense, the chemical, physical and microstructural characterization of a RHA in the south of Brazil was carried out, in order to know the properties of the RHA generated in fluidized bed. The analyzes revealed that the RHA generated through the fluidized bed reactor is a pozzolan, as it contains 94.40% of SiO_2. Therefore, it presents the potential to replace Portland cement, an alternative to the construction industry that seeks new materials aiming at preserving nature.

KEYWORDS: RHA, properties, pozzolana, fluidized bed.

1 | INTRODUÇÃO

A casca de arroz, que atualmente vem substituindo a lenha utilizada na geração de calor e de vapor necessários para os processos de secagem e parboilização do arroz[8], perde seus nutrientes e é de difícil degradação[11], tornando-se um material contaminante ao solo e, com isso, de necessidade de descarte controlado. No entanto, com o processo, é gerada uma cinza praticamente amorfa, com elevado teor de sílica e com características muito desejadas como material pozolânico. Para Krug[9], a casca de arroz é um material fibroso, composto por celulose, lignina e resíduos orgânicos, sendo que a celulose compreende 50% do material. Além disso, 95 a 98% do resíduo orgânico correspondem à estrutura amorfa hidratada, o SiO_2, sendo 20% do total da casca.

Os avanços nas pesquisas sobre materiais para construção civil têm mostrado que a cinza da casca de arroz (CCA) (Figura 1), quando estruturalmente amorfa e reativa, pode ser aplicada como material pozolânico em substituição parcial ao cimento Portland

na produção de concretos e argamassas[5]. Seu uso vem contribuindo com a redução do impacto ambiental, bem como na redução do consumo de reservas de insumos não renováveis para a produção de cimento[6], responsável pelas emissões atmosféricas[9] e pelo uso, como resíduo, na queima de processos industriais. Embora com tais características, a CCA ainda apresenta dificuldade de comercialização e consumo de alta escala por irregularidade no processo de produção, relativos a queima, o que afeta as propriedades finais do material gerado.



Figura 1 – Cinza de Casca de Arroz (CCA).

Fonte: CALHEIRO, 2011[6].

Segundo Sensale [11] a queima tem grande influência nas propriedades químicas da cinza. Quando produzida por queima não controlada, apresenta elevada quantidade de sílica não reativa (cristalina) na composição, que, quando moída, desenvolve propriedades pozolânicas. Por outro lado, as cinzas produzidas por queima controlada apresentam teores mais elevados de matéria reativa, o que eleva seu potencial pozolânico. Tais sílicas, tanto de queima controlada, quanto não controlada com moagem até elevada finura (< 10 µm), reagem quimicamente quando em contato com os rodutoas de hidratação do cimento Portland, resultando em mais compostos cimentantes responsáveis pela resistência mecânica.

O presente estudo tem por objetivo identificar e caracterizar às propriedades químicas, físicas e microestruturais de uma CCA de origem comercial, produzida por queima controlada em forno de leito fluidizado. Serão apresentadas caracterizações para posterior avaliação do potencial pozolânico para utilização em matrizes cimentícias, considerando os percentuais mínimos estimados conforme a NBR 12652[1].

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi realizada a caracterização de uma CCA quanto a parâmetros físicos, químicos, além de aspectos microestruturais. A execução das análises foi realizada na Universidade do Vale do Rio dos Sinos e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A cinza de casca de arroz utilizada foi adquirida de forma comercial, com denominação do fabricante de “Sílica da casca de arroz”, produzida em uma empresa geradora de energia localizada na cidade de Alegrete, RS. Considerada uma pozolana, é oriunda da queima de biomassa em um forno de leito fluidizado, para a geração de

energia [12].

A CCA foi submetida a uma análise química semiquantitativa de Fluorescência de Raios-X (FRX). O ensaio foi realizado em um equipamento denominado Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, por energia dispersiva, marca EDX 720HS. Esta é uma técnica que consiste na exposição da amostra a uma quantidade de radiação para agitação, onde é detectada a radiação fluorescente, sendo o resultado a interação da amostra com a radiação. O ensaio tem por objetivo a detecção de elementos químicos em variadas concentrações, através do método de medição de Raios-X por energia dispersiva e foi realizado, com técnica não destrutiva, obedecendo aos parâmetros da NBR ISO 13320[2].

Para a análise de perda ao fogo, foi utilizado 1 g de CCA, previamente seca em estufa a 100 °C e, posteriormente, pesada e levada ao forno mufla, a uma temperatura de 950 °C por um período de 3h. Ao final, a amostra foi novamente pesada até atingir massa constante. O ensaio tem por objetivo quantificar o material orgânico da amostra e tem como resultado a diferença de massa da amostra inicial e final. A técnica foi realizada conforme método ABIFA, norma CEMP n° 120.

Os parâmetros físicos foram analisados por peneiramento e granulometria de difração a laser. A partir da distribuição granulométrica foi possível identificar os tamanhos médios das partículas da CCA. A granulometria por peneiramento foi obtida através do método da ABIFA, norma CEMP 081/2003, com peneiramento manual, com uso de pincel e peneira de 75 e 53 µm, uma vez que a agitação mecânica não foi eficiente devido à finura elevada da amostra. Para a determinação e análise do tamanho das partículas, foi realizado o ensaio de granulometria por difração a laser, utilizando um difratômetro a laser *Microtac* S 3500, por via úmida, empregando água, no tempo de 30 segundos.

A análise morfológica, identificando fases cristalinas e halos amorfos, foi realizada pela técnica de Difração de Raios-X (DRX). O ensaio foi realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e tem por objetivo identificar as principais fases presentes na amostra, onde o resultado depende da estrutura cristalina e do comprimento de onda da radiação da própria amostra. O aparelho utilizado foi o Difratômetro Siemens D5000 e os resultados foram analisados por meio do software *X'Pert HighScore*.

A análise morfológica foi também realizada utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca *Zeiss*, modelo EVO MA15. As imagens foram obtidas em alto vácuo, com detectores SE (elétrons secundários) e BSD (elétrons retro espalhados) para mapeamento e EDS (análise química qualitativa). A amostra foi disposta em uma fita de carbono, sem caráter condutor, e metalizadas com uma fina camada de ouro. A técnica produz imagens de alta resolução da superfície de uma amostra, e apresentam aparências tridimensionais características, úteis para avaliar a estrutura superficial de um material.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os dados de composição química, obtidos através de FRX e perda ao fogo, em que se observa que o material é composto por SiO_2, com valores próximos a 95%, subsequente de K_2O (1,001%) e SO_3 (0,563%). A presença de Potássio

(K_2O) na casca do arroz, segundo Angel et al[3], está ligado as condições geográficas, variações climáticas, composições químicas do solo e uso de fertilizantes na colheita do grão.

Parâmetro	ZnO	Fe_2O_3	MnO	TiO_2	CaO	K_2O	Cl	SO_3	P_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	MgO	LOI	**Total**
Teor (%)	0,004	0,053	0,194	0,008	0,326	1,001	0,430	0,563	0,099	94,404	0,178	0,007	2,733	**100**

Tabela 1 – Caracterização química da CCA.

Fonte: As autoras.

O percentual de matéria orgânica (LOI) estimado através de perda ao fogo corresponde a 2,73% da amostra. Segundo Calheiro (2011)[6], as cinzas resultantes de queimadores de leito fluidizado apresentam menos impurezas em função da temperatura de queima ser controlada, sendo que o teor de SiO_2 e perda ao fogo estão inter-relacionados, em que quanto maior o teor de sílica na amostra, menor será o valor de perda ao fogo. Logo, é possível afirmar que para a obtenção da CCA houve um bom desempenho no processo de combustão da casca, obtendo-se um alto teor de SiO_2 e baixo teor de matéria orgânica no material.

A composição de fases da CCA, obtida através de difratograma de Raios-X (Figura 2), se mantém praticamente amorfa com alguns picos de material cristalino, sendo de cristobalita e quartzo. Conforme Angel *et al*.[3], os picos aliados à presença de zonas cristalinas referem-se a contaminações do material inerte empregado, areia (sílica cristalina na forma de quartzo), essencial no processo de fluidização da casca de arroz. O difratograma apresenta halo de baixa intensidade, com ângulo 2θ entre 20 e 35°, seguindo relatos de Angel *et al*. [3]. Para Cordeiro, Filho e Fairbairn [7], a presença da cristobalita na amostra é derivada da temperatura de queima do material, que é gerada a partir da queima em temperaturas superiores a 800 °C.

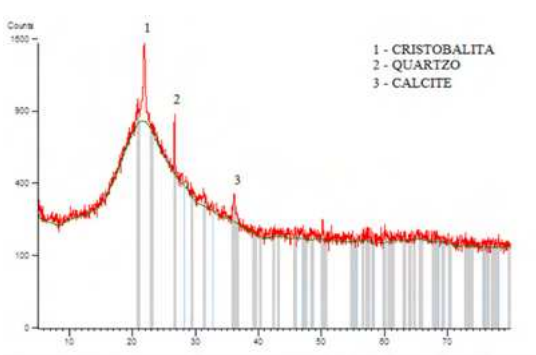


Figura 2 – Difratograma de Raios X da CCA.

Fonte: As autoras.

Ao realizar-se o peneiramento mecânico da CCA de leito fluidizado verificou-se que as partículas apresentam uma tensão superficial elevada, gerando um aglomeramento das partículas e impedindo a realização do ensaio de forma mecânica. Essa tensão superficial pode estar correlacionada à finura da amostra, em que, quanto mais fina as partículas, maior a tensão sobre elas, mesmas durante o ensaio. Logo, optou-se por realizar o peneiramento manual onde se observou que o material se apresentou, na totalidade, passante na peneira de 53 µm. No resultado de distribuição granulométrica por difração à laser (Figura 3) verificou-se que o tamanho médio das partículas (D50) é de 7,97 µm.

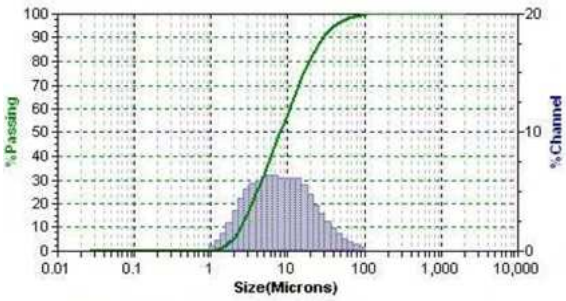


Figura 3 – Distribuição granulométrica da CCA obtida por difratometria a laser.

Fonte: As autoras.

A Tabela 2 apresenta os valores de diâmetro equivalente a 10, 50 e 90% de massa acumulado. Observa-se que 90% (D90) das partículas apresentam diâmetro menor que 28,93 µm, e apenas 10% atribuem-se a granulometria menor que 2,44 µm. A finura é de grande importância para a caracterização do material empregado, porque o material fino preenche os vazios, o que resulta no efeito fíler[10]. Todavia, a finura elevada da CCA, observando o diâmetro médio D50 de 7,97 µm, contempla o questionamento da forma de utilização em usinas de concreto e argamassa quanto à segurança no trabalho. Segundo Bezerra *et al*.[4], a cinza é considerada altamente prejudicial para a saúde humana, pois, quando de grande exposição, pode causar uma afecção pulmonar, conhecida como silicose.

Diâmetro	CCA
D10 (10%)	2,45 µm
D50 (50%)	7,97 µm
D90 (90%)	28,93 µm

Tabela 2 – Distribuição do tamanho de partículas.

Fonte: As autoras.

A caracterização microestrutural da CCA (Figura 4) mostrou que o material é

homogêneo, com grãos muito pequenos, conforme granulometria anterior. O formato alongado e contorcido, com aspecto de "espiga de milho", característico da casca de arroz [13] não foi detectado neste material, este fato deve-se ao elevado grau de finura da amostra, onde os poros foram corrompidos deixando o material mais homogêneo. As partículas de maior dimensão encontradas na CCA apresentam forma lamelar e são visualizadas na Figura 4b. As Figuras 4a e 4b apresentam imagens de microscopia obtidas através do detector eletro secundário (SE), com aumento de 500 (4a) e 15000 (4b) vezes. E as Figuras 4c e 4d são imagens obtidas através de detector de elétrons retro espalhados (BSD).

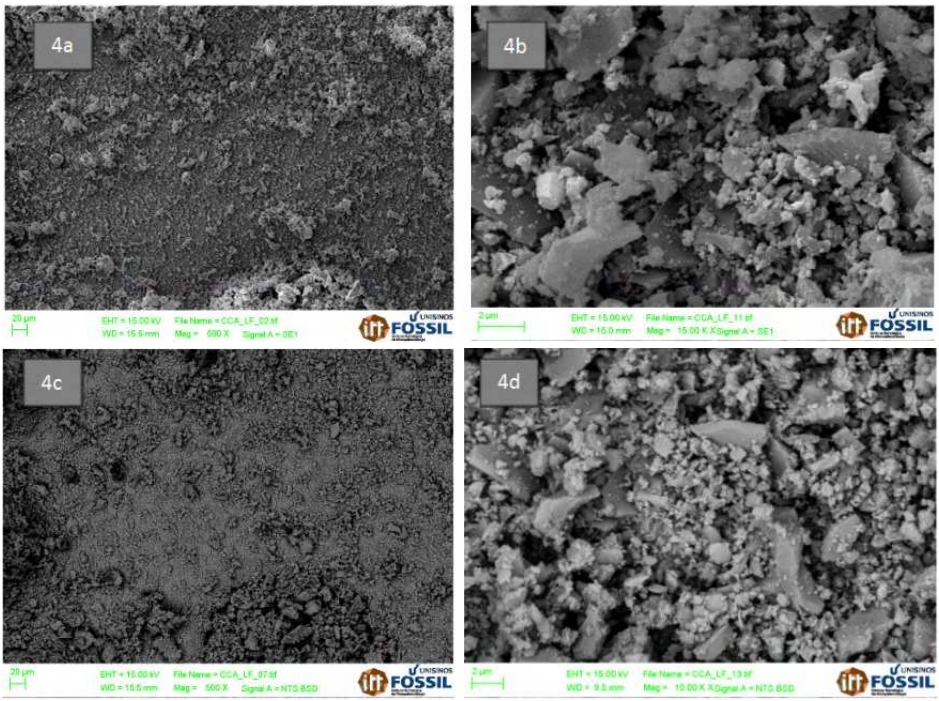


Figura 4 – Características microestruturais da CCA: (a) distribuição granulométrica variada; (b) aspecto morfológico a partir de SE; (c) homogeneidade da CCA por BSD; (d) aspecto morfológico a partir de SE

Fonte: As autoras.

De modo geral, os resultados acerca do estudo mostram que a CCA é formada basicamente por sílica amorfa com teor de 94,40% de SiO_2 e baixo teor de carbono (< 2,73%). Embora não informado o processo de obtenção da CCA quanto à temperatura, pode-se considerar que, por meio de características químicas e morfológicas, o material em estudo foi produzido com temperatura superior a 800 °C, por processo controlado, devido à presença de cristobalita e baixa presença de carbono.

O difratograma de Raios-X apresenta halos amorfos com alguns picos cristalinos.

A presença de quartzo cristalino é, possivelmente, resultante do material inerte utilizado no processo de combustão da CCA. A análise microestrutural apresenta uma cinza homogênea, sem a presença de partículas em forma de "espiga de milho", como usualmente encontrado na literatura. As partículas são densas, sem a presença de poros, e muito pequenas. Os resultados de granulometria manual e por difração a laser apresentam tamanhos de partículas muito menores do que as usualmente encontradas para a CCA.

4 | CONCLUSÕES

Usualmente utilizada como material pozolânico em matrizes cimentícias, a CCA, apresenta-se com potencial para tal, atendendo a alguns requisitos da NBR 12652. Os requisitos químicos normativos exigem teores de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 que chegam a aproximadamente 95%, superior a exigência mínima de 65%. O material de carbono também é adequado, indicando 2,733%, inferior aos 6% máximos exigidos. Teores de SO_3 também atendem aos requisitos normativos, sendo o limite máximo de 5% e a quantidade presente na amostra de 0,563%.

Quanto às exigências físicas, a finura apresenta granulometria inferior a 45 µm, com 90% do material com dimensão de partícula inferior a 28,93 µm. Apresenta diâmetro médio (D50) de 7,97 µm, o que gera vantagem quanto ao preenchimento de poros de matrizes cimentícias e melhor efeito pozolânico, finalidade a qual é destinada em meio a essas matrizes.

Por fim, quanto às exigências e forma como é oferecida ao mercado, a CCA de leito fluidizado de origem comercial atende as exigências normativas. Todavia, torna-se um problema à segurança do trabalho, uma vez que a finura elevada do material pode gerar, em função da exposição, doenças respiratórias como a silicose, resultando no aumento das exigências quanto à utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) adequados.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12652:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13320:** Particle size analysis – Laser diffraction methods. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

3. ANGEL, M. D. J.; VÁSQUEZ, P. G. T.; JUNKES, A. J.; HOTZA, D. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. **Química Nova,** v. 32, n. 5, p. 1110-1114, 2009.

4. BEZERRA, I. M. T.; SOUZA, J.; CARVALHO, J. B. Q.; NEVES, G. A. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental,** v. 15, n. 6, p. 639–645, 2011.

5. BRANDÃO JÚNIOR, J. R. **Incorporação de cinza de casca de arroz vermelho na elaboração de argamassa para o reparo de canais.** 2017. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB, 2017.

6. CALHEIRO, D. **Influência do uso de aditivos na moagem de cinzas de casca de arroz para sua adequação como co-produto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

7. CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures,** v. 42, p. 983-992, 2009.

8. FLORIANO, F. J. **Valorização dos resíduos do processo de anodização de alumínio e cinza de casca de arroz por meio da obtenção de zeólitas.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Florianópolis, 2014.

9. KRUG, L. F. **Influência da segregação da cinza de casca de arroz em concretos como substituição parcial do cimento Portland.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.

10. RODRIGUES, M. S; BERALDO, A. L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 193-204, mar./abr. 2010.

11. SENSALE, G. R. Effect of Rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 718-725, 2010.

12. SILVEIRA, L. B. **Caracterização e avaliação de diferentes tipos de cinza de casca de arroz com vistas ao emprego como pozolanas em concreto**. 2013. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2013.

13. SOUZA, R.; FOLGUERAS, M. V.; MEDEIROS, S. H. W. S**íntese de zeólitas ZSM – 5 a partir de metacaulim comercial e casca de arroz como fontes alternativas de sílica e alumina.** *In:* 57º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2013, Natal, RN. **Anais [...].** Natal: 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica, 2013, p. 653-663.



INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SUBPRODUTOS NA DISPERSÃO DE PARTÍCULAS DE CIMENTO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081122

MARTINS; JULIA [1]; ROCHA; JANAÍDE [2]
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: JULIA.D4.ROSA@GMAIL.COM

RESUMO: Este estudo pretende verificar como a adição de subprodutos da construção afeta a dispersão das partículas de cimento. O cimento utilizado foi o CPIIF40 e os subprodutos foram: cinza volante e sílica. Realizaram-se medições de potencial zeta dos materiais utilizados no estudo para analisar a interação entre as partículas com base na natureza e módulo das cargas. Ainda, mediu-se a velocidade de sedimentação das partículas, com vistas a vincular o potencial zeta à dispersão das suspensões. Os resultados mostram que o aumento da carga entre as partículas garante maior dispersão e, consequentemente, menores velocidades de sedimentação.

PALAVRAS-CHAVES: Materiais finos, potencial zeta, sedimentação, dispersão.

ABSTRACT: This study aims to verify how the addition of construction byproducts affects the dispersion of cement particles. The cement used was CPIIF40 and the by-products were: fly ash and silica. Zeta potential measurements of the materials used in the study were performed to analyze the interaction between the particles based on the nature and modulus of the charges. Also, the sedimentation velocity of the particles was measured, in order to link the zeta potential to the dispersion of the system. The results show that increasing the charge between the particles ensures greater dispersion and, consequently, lower sedimentation velocities.
KEYWORDS: Fine materials, zeta potential, sedimentation, dispersion.

1 | INTRODUÇÃO

Partículas dispersas em meio líquido tendem a interagir entre si. De acordo com Valencia[(1)], em partículas com dimensões menores do que 100µm a interação é causada principalmente por forças atuantes na superfície da partícula. Quando as partículas apresentam forças atrativas superiores às repulsivas, há tendência a aglomeração, conforme Oliveira[(2)]. Uma das forças de superfície que define a interação entre partículas em suspensão é o potencial zeta. Segundo Dinger[(3)], o potencial zeta pode ser definido como o potencial eletrostático no plano de cisalhamento de uma partícula dispersa.

Quando se trata de potencial zeta, dois fatores são importantes para definir a interação entre as partículas, a natureza e a magnitude da carga. Partículas com cargas de mesmo sinal irão se repelir e partículas com cargas de sinal contrário irão se atrair. A magnitude da carga define a força de atração ou repulsão das partículas. Esses fatores se alteram com a mudança do pH do meio em que as partículas estão dispersas.

Outro fator a ser considerado é o ponto isoelétrico, que é o ponto em que as partículas não apresentam cargas superficiais. O ponto isoelétrico é considerado o ponto onde haverá maior tendência à aglomeração das partículas e quanto mais baixo é, em módulo, o potencial zeta de uma partícula, mais próximo ao ponto isoelétrico ela se encontra.

Em pastas e argamassas, o potencial zeta pode influenciar diretamente nas propriedades reológicas[4]. Quando não há repulsão entre as partículas de cimento, há uma tendência à formação de aglomerados e como resultado, um material menos homogêneo. O elevado potencial zeta negativo também pode implicar na adsorção de aditivos incorporadores de ar[5] e hidratação precoce de suspensões de cimento[6].

Considerando que o potencial zeta pode variar de acordo com as condições em que as partículas estão dispersas, como concentração e pH por exemplo, a incorporação de subprodutos à suspensões com cimento pode acarretar em alterações no potencial zeta das partículas e, consequentemente, interferir em alguns aspectos da suspensão.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar como a adição dos subprodutos, sílica e cinza volante, afeta o potencial zeta das partículas de soluções contendo cimento e quais os efeitos dessa alteração para a dispersão das suspensões.

2 | METODOLOGIA

Para avaliar a influência dos subprodutos na dispersão das partículas de cimento, seguiu-se um programa experimental contendo preparo e caracterização do cimento e dos subprodutos e a análise das partículas em suspensão com a medição do potencial zeta e velocidade de sedimentação.

2.1 Materiais

O cimento utilizado para a pesquisa foi o CPIIF40, De acordo com a Norma NBR 16697[7], esse tipo de cimento é composto por clínquer e sulfatos de cálcio (75 à 89%) e material carbonático (11 à 25%).

Os subprodutos utilizados foram cinza volante e sílica. A cinza volante e a sílica passaram pela estufa com temperatura de 105 °C durante 24 horas, para garantir a perda da umidade. Todos os subprodutos foram peneirados na peneira de 0,075mm.

As características físicas dos materiais são apresentadas na Tabela 1 e a curva granulométrica de cada material é mostrada na Figura 1. A massa específica dos materiais foi verificada utilizando o picnômetro. A granulometria foi medida por meio do equipamento LUMiSizer.

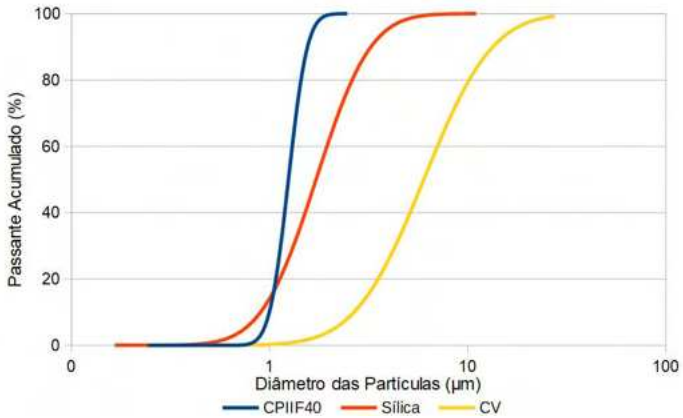


Figura 1 – Granulometria dos materiais.

Material	Massa Específica (g/cm³)	d10 (µm)	d50 (µm)	d90(µm)
CP II F 40	3,09	1,143	1,211	1,473
Sílica	2,66	1,061	1,677	4,158
Cinza Volante	2,09	2,697	6,336	11,888

Tabela 1 – Características físicas dos materiais.

A composição química com os principais óxidos que compõem os materiais utilizados no estudo é apresentada na Tabela 2 e foi obtida por meio da e*spectroscopia* de energia dispersiva de raio X (EDX).

Óxidos	CP II F 40	Sílica	CV
CaO	69,74%	-	3,42%
SiO_2	17,46%	95,45%	61,99%
SO_3	4,22%	-	0,43%
Fe_2O_3	3,41%	0,004%	3,05%
K_2O	1,02%		1,87%
Al_2O_3	-		27,38%
CO_2 (Perda ao fogo)	3,44%	4,39%	0,09%

Tabela 2 – Composição química dos materiais

2.2 Métodos

Os ensaios de potencial zeta foram realizados no equipamento ZetaSizer Malvern

Nano25, em duas etapas distintas. A primeira etapa teve como objetivo verificar como o potencial zeta das partículas de cimento se modificava conforme a alteração do pH. Para a medição, variou-se o pH da amostra, utilizando ácido clorídrico (0,5M) e hidróxido de sódio (1M). A medição iniciou com o pH igual à 12 e foi finalizada com o pH igual à 2. Para a segunda etapa, mediu-se o potencial zeta da cinza volante e da sílica separadamente nos pH indicados na Tabela 3.

Com o objetivo de relacionar a velocidade de sedimentação com a dispersão das partículas em suspensão, fez-se ensaios no equipamento LUMiSizer. O ensaio consiste em submeter as amostras à aceleração centrípeta, forçando as partículas dispersas a se aglomerarem na extremidade do porta amostra. O porta amostra fica localizado entre uma fonte de luz e um receptor, conforme as partículas se movimentam e se acumulam, a passagem de luz através da amostra aumenta. Assim o equipamento mensura a velocidade de sedimentação das partículas. A Tabela 3 apresenta a composição das amostras ensaiadas.

Potencial Zeta				Velocidade de Sedimentação					
Amostra	Quantidade de Material (g)	Água (mL)	pH	Amostra	Cimento (g)	Sílica (g)	Cinza Volante (g)	Água (mL)	pH
CPIIF40	0,3	60,0	2 à 12	100%C	3,0	-	-	60,0	11,8
Sílica	0,3	60,0	11,7	50%C50%Sílica	1,5	1,5	-	60,0	11,7
Cinza Volante	0,3	60,0	10,8	50%C50%CV	1,5	-	1,5	60,0	10,8

Tabela 3 – Composição e pH das amostras para os ensaios de potencial zeta e velocidade de sedimentação

A concentração de cimento e/ou subprodutos para as amostras de velocidade de sedimentação é maior que para as amostras de potencial zeta, devido as especificidades de cada equipamento. Essa diferença de concentração faz com que o pH das amostras para cada um dos ensaios seja diferente. Como o potencial zeta é dependente do pH, para garantir que a magnitude e natureza das cargas das partículas medidas sejam equivalentes às que as partículas apresentaram no ensaio de velocidade de sedimentação, verificou-se o pH de cada uma das amostras antes do ensaio de sedimentação e titulou-se as amostras para o ensaio de potencial zeta para que ficassem com o pH correspondente. O pH medido antes do ensaio de sedimentação está descrito na Tabela 2. Na titulação das amostras para atingirem o pH indicado utilizou-se hidróxido de sódio (1M).

Para o preparo das amostras, primeiro colocou-se a quantidade indicada cimento e/ou subproduto num recipiente de vidro, em seguida adicionou-se a água. No caso da velocidade de sedimentação, mediu-se o pH. Para as amostras de potencial zeta, foi feita a titulação. Após o preparo, os recipientes com as suspensões foram colocados no ultrassom, com uma frequência de 40 kHz durante 10 minutos. Imediatamente após retiradas do ultrassom, as amostras foram submetidas aos ensaios de potencial zeta e velocidade de sedimentação.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a medição do potencial com a variação do pH, pode-se perceber a tendência à diminuição de carga das partículas de cimento tanto em pH básico quanto em pH ácido. Em valores de pH neutro (próximo à 7), o cimento apresentou valores maiores de carga. A Figura 2 apresenta o gráfico de potencial zeta em função do pH do CP II F 40.

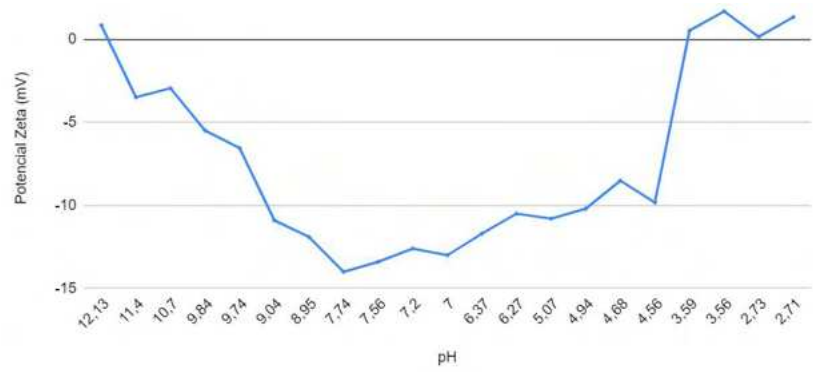


Figura 2 – Alteração do potencial zeta do CP II F 40 com a variação do pH

A velocidade de sedimentação do cimento e dos subprodutos, bem como o potencial zeta apresentado por cada um deles estão descritos na Tabela 4.

Amostra	pH	Velocidade de Sedimentação (cm/s)	Potencial zeta no pH indicado		
			CP II F 40	Sílica	CV
100%C	11,8	0,147	+0,49	-	-
50%C50%Sílica	11,7	0,193	+0,49	-4,5	-
50%C50%CV	10,8	0,024	-3,2	-	-23,3

Tabela 4 – pH, velocidade de sedimentação das amostras e potencial zeta dos materiais constituintes

Pode-se perceber que a amostra contendo apenas cimento (100%C) apresenta potencial zeta de 0,49 mV, que é um valor muito próximo ao ponto isoelétrico do material. Nessas condições, as partículas de cimento aglomeram com facilidade.

A mistura entre a sílica e cimento (50%C50%Sílica) apresenta condições propícias à hétero aglomeração, já que as partículas de cimento e de sílica apresentam potencial zeta com cargas opostas, fazendo com que haja uma atração entre as partículas dos materiais. Como o cimento e a sílica apresentam potencial zeta com baixo módulo, é provável que, além da hétero aglomeração, ocorra a aglomeração das partículas de

cimento entre si, bem como a aglomeração entre as partículas da sílica. Comparada à velocidade de sedimentação da amostra 100%, a amostra 50%C50%Sílica apresenta velocidade de sedimentação 31% maior.

A adição de cinza causou uma diminuição significativa no pH com relação à amostra contendo somente cimento (100%C), o que acarretou no aumento em módulo do potencial zeta das partículas de cimento, bem como a alteração da natureza da carga, passando de positiva (na amostra 100%C) para negativa (50%C50%CV). No caso da mistura entre o cimento e a cinza volante (50%C50%CV) não há probabilidade de hétero aglomeração, já que ambos os materiais possuem potencial zeta com carga negativa. As partículas de cinza não irão aglomerar entre si, pois o material apresentou alto potencial zeta, o que acarreta em repulsão entre as partículas. O aumento, em módulo, do potencial zeta cimento contribuirá para que haja menos aglomeração entre as partículas quando comparadas às partículas da amostra 100%C, mas como o potencial zeta ainda continua com valor baixo, ainda haverá aglomeração. Observou-se que nas amostras de cinza volante (50%C50%CV) houve uma redução de 85% na velocidade de sedimentação em comparação à amostra contendo somente cimento (100%C).

Sabendo que partículas aglomeradas tendem a sedimentar mais rapidamente, pode-se relacionar a alta velocidade das amostras 100%C e 50%C50%Sílica com o potencial zeta das partículas em suspensão. Na amostra 50%C50%Sílica, a velocidade de sedimentação apresenta-se 31% maior que a amostra 100%C devido a atração entre as partículas de cimento e sílica. Na amostra 100%C, o baixo potencial zeta não evita a aglomeração. Já na amostra 50%C50%Sílica, as cargas contrárias favorecem a aglomeração, aumentando a ocorrência de aglomerados.

A amostra 50%C50%CV apresentou valores de velocidade de sedimentação inferiores às demais. O elevado potencial zeta das partículas de cinza volante e a não ocorrência da hétero aglomeração entre a cinza e o cimento contribuíram para que a velocidade de sedimentação fosse reduzida.

4 | CONCLUSÃO

Após os ensaios de potencial zeta e velocidade de sedimentação, pode-se concluir que a carga superficial das partículas pode interferir na dispersão das suspensões.

No caso da amostra com sílica (50%C50%Sílica), verificou-se uma diminuição na dispersão da suspensão quando comparado à amostra contendo somente cimento. Os baixos valores de potencial zeta permitem a aglomeração entre as partículas do mesmo material. Os sinais de carga opostos facilita a aglomeração entre as partículas de sílica e cimento. Como resultado, tem-se uma suspensão com partículas menos dispersa e maior velocidade de sedimentação.

Dentre os subprodutos utilizados, o que apresentou resultado mais satisfatório para a dispersão das partículas foi a cinza volante. Nesse caso, o potencial zeta elevado e de mesmo sinal dificulta a aglomeração das partículas, mantendo-as mais dispersas na suspensão. Como resultado da maior dispersão, obtém-se menor velocidade de sedimentação.

Como foi percebido ao longo do estudo, a adição de subprodutos pode ocasionar

mudanças na natureza e magnitude da carga das partículas de cimento. Também pode haver diferentes tipos de interações entre as partículas do subproduto e as partículas de cimento, dependendo do potencial zeta de cada um deles.

Na prática, é importante conhecer o potencial zeta das partículas que compõem as pastas e argamassas. O potencial zeta determina o grau de interação entre as partículas e, consequentemente, a aglomeração entre elas. Em pastas e argamassas, os aglomerados influenciam na reologia e representam um produto final menos homogêneo. Além disso, a magnitude e natureza da carga das partículas terá influência em outros aspectos, como na eficácia de aditivos incorporadores de ar[5] e na coalescência de bolhas[8], por exemplo.

REFERÊNCIAS

1. VALENCIA, Gabriela Araujo. **Estudo das características de dispersão de suspensões de carbonato de cálcio**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

2. OLIVEIRA, IR de et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo arte editorial**, v. 224, p. 119-137, 2000.

3. DINGER, Dennis. Medidas de pontos isoelétricos sem o uso de analisador de potencial zeta. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, p. 23-24, 2006.

4. CYR, Martin.**Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires**. 1999. Tese de Doutorado. INSA de Toulouse; Université de Sherbrooke.

5. Lianxiang Du and Kevin J Folliard. **Mechanisms of air entrainment in concrete**. Cement and concrete research, 35(8):1463–1471, 2005.

6. ZINGG, A. et al. **Adsorption of polyelectrolytes and its influence on the rheology, zetapotential, and microstructure of various cement and hydrate phases**. Journal of Colloidand Interface Science, Elsevier, v. 323, n. 2, p. 301–312, 2008.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

8. ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** 2002.



COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM GRÃOS DE POLIPROPILENO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À FLEXÃO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081123

COELHO,RIVALDO TEODORO[1]; DUCATTI, VITOR ANTONIO[2]; SALADO, GERUSA DE CÁSSIA[1]

[1]UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LIMEIRA - FT/ UNICAMP;

[2]UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO - FEC/UNICAMP

SÃO PAULO/SP, BRASIL.

E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: R004594@DAC.UNICAMP.BR

RESUMO: O objetivo é analisar a resistência à compressão axial e à flexão de um compósito cimentício-polimérico a base de cimento Portland tipo CPV/ARI tendo como agregados a areia e grãos reciclados aglutinados de polipropileno (GRAPP) como substituto dos agregados graúdos. Os resultados demonstraram resistência à compressão axial de 31,96 MPa e resistência à tração na flexão de 5,59 MPa com 30% de substituição da areia e 100% do agregado graúdo rochoso pelo GRAPP na mistura tipo P_6, resultados que permitem indicar sua aplicação como material para a construção civil e contribuir para a redução dos impactos ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos, plásticos, reciclagem, polipropileno, engenharia de materiais.

ABSTRACT: The objective is to analyze the resistance to axial compression and bending of a cementitious-polymeric composite based on Portland cement type CPV-ARI having as aggregates the sand and recycled grains agglutinated polypropylene (GRAPP) as a substitute for the coarse aggregates. The results showed axial compressive strength of 31.96 MPa and tensile strength in the bending of 5.59 MPa with 30% sand substitution and 100% of the coarse aggregate rocky by GRAPP in the P_6 type mixture, results that allow indicating its application as a material for civil construction and contributing to the reduction of environmental impacts.

KEYWORDS: Composites, plastics, recycling, polypropylene, materials engineering.

1 | INTRODUÇÃO

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Plástica - ABIPLAST (2018) (1), desde 1950 até 2015, a produção mundial de plásticos cresceu de 2 milhões de toneladas para 407 milhões de toneladas anuais. Estima-se que já foram produzidos cerca de 8300 milhões de toneladas das quais 6300 já foram descartadas. Deste 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. Previsões da Fundação Heirich Böll, apresentadas em seu Atlas do Plástico 2020(2), até

2050, mantidas tais tendências, estima-se que a fabricação de plásticos poderá emitir 56 gigas toneladas de CO_2, equivalentes a 13% do limite estimado de emissões de CO_2 para que o aquecimento global não ultrapasse 1,5 graus Celsius.

No Brasil, ainda segundo dados ABIPLAST (2018) [(1)], 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%. Dentre os materiais utilizados em compósitos cimentícios constantes em revisões sistemáticas no Brasil e internacionais[1], destacam-se 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 (RCD), aparas de couro, dentre outros. Com relação ao polipropileno na forma de grãos reciclados aglutinados, ou GRAPP, existem poucas pesquisas nacionais e internacionais, sendo mais frequentes os formatos de fibras, pellets, flocos, e outros grãos lisos.

Akinyele, Salim e Oyeti, (2015) [(3)], por exemplo, 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.

Neste trabalho foram utilizados grãos reciclados aglutinados de polipropileno – GRAPP, com formato arredondado e estriados, industrialmente modificados, obtidos a partir de descartes industriais compostos por recortes, sobras ou peças não-conformes retiradas dos processos de fabricação nas linhas de produção. Neste contexto, justifica-se a importância de estudar o polipropileno na forma de grãos reciclados aglutinados como potencial componente de compósitos de matriz cimentícia, contribuindo no desenvolvimento de novos materiais compósitos aplicáveis na construção civil, praticando a reciclagem de materiais plásticos, prolongando seus ciclos de vida e gerando benefícios diretos na redução de impactos ambientais bem como desenvolvendo alternativas de solução para as questões sociais habitacionais.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o objetivo deste trabalho, foram ensaiados corpos de prova cúbicos e cilíndricos para determinar algumas propriedades mecânicas no estado endurecido do compósito resultante, principalmente a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão. Importante ressaltar que, os ensaios utilizados consistem nas versões das Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas disponíveis à época do início destes estudos, entre os anos de 2004 e 2005. Tais estudos continuam inéditos e foram reiniciados em 2019 por meio de estudos de pós-graduação, doutorado em tecnologia na área de ciência dos materiais onde são desenvolvidos novos ensaios, desta vez com

1 Ver nota contendo link com mapas resumidos de revisão bibliográfica base Scopus e Portal CAPES CAF(e), após o item 4. Referências.

normativas vigentes atualmente.

2.1 Materiais componentes do concreto

O cimento utilizado no desenvolvimento desta pesquisa foi o CP-V-ARI - Resistência Inicial - ABNT NBR 5733:1991[4], com a finalidade de se obter altas resistências desde as primeiras idades do compósito e próximas daquelas atingidas aos 28 dias. Com relação ao agregado miúdo, a areia utilizada foi ensaiada para determinação de sua massa específica aparente, massa unitária e curva granulométrica e a massa especifica aparente da areia foi determinada pelo ensaio do frasco de Chapman pelo método NBR 7217:1987 [5], sendo que tais resultados estão registrados na tabela 2, item 3.1. Utilizou-se o aditivo químico 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) [6], ASTM/ C-1017 [7]. Os agregados graúdos foram totalmente substituídos por grãos reciclados aglutinados de polipropileno (GRAPP) cuja curva granulométrica foi obtida por meio do ensaio determinado pela Norma brasileira NBR 7211:83 [8]. Neste ensaio, também foi determinada a dimensão máxima característica dos grãos de polipropileno aglutinado reciclado (9,50mm) e seu módulo de finura (5,81) utilizando-se a mesma Norma.

2.2 Dosagem e misturas

Após a caracterização dos materiais, iniciou-se a dosagem das misturas 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 substituindo os corpos de prova cúbicos por 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 (P_1 a P_{10}), correspondente às misturas com substituição parcial da areia pelo GRAPP em intervalos de 5% da massa total dos agregados. Desta série, foram descontinuadas as análises das P_8 e P_9 pelo fato de não atingirem a meta de pelo menos 30 MPa em termos de resistência à compressão axial, valor este comum em concretos comerciais convencionais.

2.3 Confecção 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 P_{21} e P_{22}, correspondentes às misturas com substituição total da areia pelo GRAPP sendo seus traços respectivamente 1:0,3 e 1:0,4 mantendo-se as proporções para a relação água/cimento e superplastificante adotados na série A. O traço de referência foi identificado como P_0. 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

premissas:

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 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 (Coelho) [9].

2.3.2 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, P_6 e P_{10} e uma da Série B (sem areia), P_{22} sendo mantidos os traços iniciais, sem ajustes. Destas séries foram ensaiados com corpos-de-prova cilíndricos conforme Norma ABNT NBR-5738 [10], 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.

2.3.3 Normas utilizadas na execução dos ensaios:

Os ensaios para a determinação da composição granulométrica, seguiram a Norma NBR 7217:1987[5]. Massa específica aparente dos grãos de polipropileno aglutinado foi por meio do frasco de Chapman, adaptando-a às características do agregado. A determinação da massa unitária em conformidade com a Norma ABNT NBR 7251:1982 [11]. A resistência à compressão axial, baseou-se na Norma ABNT NBR 7215:1996 [12]. A resistência à tração na flexão, orientada pela Norma NBR ABNT 12142:1992 [13].

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Caracterização dos materiais

A tabela 1, acima, apresenta os resultados dos ensaios de granulometria da areia e do GRAPP incluindo a determinação da massa específica e massa unitária destes materiais.

Areia				GRAPP			
Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)	Módulo de Finura (areia fina)	Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)	Módulo de Finura
2,40	**2,62**	**1,39**	**1,57**	**9,50**	**0,93**	**0,34**	**5,81**

Tabela 1: Caracterização do agregado miúdo(areia) e do GRAPP

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 para os quais foram preparadas duas séries sendo a "A" (P1 a P10) e série "B" (P21 e P22), com graduações de GRAPP a cada 5%, além do traço de referência.

Características das Amostras e Misturas					Traço em Massa (kg)				
Séries	**Misturas**	**Massa Especifica (g/cm³)**	**Redução da massa específica relativa a P0 (%)**	**Substituição da areia pelo GRAPP (%)**	**Cimento**	**Areia**	**GRAPP**	**Relação 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
	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

Tabela 2: Características dos traços das misturas com GRAPP

3.2 Análise dos resultados referentes às resistências à compressão axial e tração na flexão dos corpos de prova do tipo P_6.

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 e perda de menos de 2% de resistência na tração por flexão, o traço P_6 ainda manteve a sua capacidade de resistir aos esforços solicitantes de compressão axial acima de 30 MPa. A tabela 3 permite analisar e concluir que, as misturas de P_3 (cimento 1,00: areia 0,14: GRAPP 0,06: água/cimento 0,30) a P_6 (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 fato que indica potencial tenacidade. Com relação às perdas de resistências comparadas ao traço referência (P_0), pode ser considerada normal levando-se em consideração as duas premissas descritas no item 2.3.1. tendo também em vista que um traço rico em cimento CP-V-ARI pode compensar as perdas de resistências impostas pela redução do agregado miúdo e graúdo originárias de rochas ígneas vulcânicas como o granito e o basalto (pedras britadas).

Análise Seletiva dos Corpos de Prova						
Séries	**Cúbicos**		**Cilíndricos**			
	Resistência a Compressão Axial (MPa)	**Redução da Resistência a Compressão Axial (%)**	**Resistência a Compressão Axial (MPa)**	**Redução da Resistência a Compressão Axial (%)**	**Resistência a Tração na Flexão**	**Redução da Resistência Tração na Flexão (%)**
Referência P0	89,97	0,00	89,97	0,00	5,69	0,00
Série A P6	***29,51***	***-67,20***	***31,96***	***- 64,48***	***5,59***	***- 1,76***
Série A P10	11,26	-87,48	7,55	- 91,61	2,15	- 62,04
Série B P22	28,15	-68,71	19,02	- 78,86	3,15	- 44,64

Tabela 1: Análise dos resultados dos ensaios físico-mecânicos

4 | CONCLUSÕES

O GRAPP, grão reciclado aglutinado de polipropileno pode contribuir para a substituição parcial dos agregados minerais convencionais como a pedra britada e a areia e, quando bem combinados, areia e grãos podem oferecer um pacote granulométrico que se apresenta satisfatoriamente fechado, resultando em resistências mecânicas adequadas a diversas aplicações, em princípio, não estruturais, diminui as densidades aparentes do compósito, apresentou significativo ganho de ductilidade, potencialmente utilizável na produção de componentes construtivos pré-moldados ou pré-fabricados, a reduzindo o consumo de agregados naturais e a possível redução dos custos diretos e dos preços finais de produtos pré-fabricados além de beneficiar diretamente ao meio ambiente em razão de sua reciclagem.

AGRADECIMENTOS

- Às empresas Lafarge-Holcim Cimentos, Neuplast, e BASF Química;

- Equipe de funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – FEC/UNICAMP-Campinas e professores e colaboradores da FT/UNICAMP-Limeira.

REFERÊNCIAS

1. ABIPLAST. **Brazilian Plastic Processed and Recycling Industry 2018 Profile – Preview**. Disponível em http://www.abiplast.org.br/publicacoes/preview-perfil/. Acesso em 14/04/2019.

2. Atlas do Plástico: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Organização: Marcelo Montenegro, Manoela Vianna, Daisy Bispo Teles. 1. ed. Rio de Janeiro: Fundação Heirich Böll, 2020.

3. AKINYELE, Joseph Olawale (a); SALIM, Ramadhan 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.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7217**: agregado: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987b.

6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM C-494**: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, USA, 2004.

7. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM C1017 / C1017M-98**, Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 1983.

9. 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.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos: procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7251**: agregado em estado solto: determinação da massa unitária: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982b.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1980.

13. 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.

COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM BAIXO TEOR DE CASCA DE ARROZ COMO BIOAGREGADO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081124

AMANTINO, GUILHERME[1]; TIECHER, FRANCIELI[2]; HASPARYK, NICOLE[3]; TOLEDO, ROMILDO[4]
[1]FACULDADE IMED; [2]FACULDADE IMED; [3]ELETROBRAS FURNAS; [4]UFRJ
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: AMANTINO.ENG@GMAIL.COM

RESUMO: Resíduos agroindustriais podem ser atrativos como agregado para construção. Esta pesquisa avaliou o emprego de baixo teor de casca de arroz como bioagregado no concreto. O estudo experimental utilizou a casca in natura e tratada (teor de 1% em volume) como agregado miúdo, e incorporou cinza de casca de arroz em substituição ao cimento (8%, em massa). Foram avaliadas a retração por secagem e o comportamento mecânico dos concretos até 6 meses de idade. Os bioconcretos obtidos apresentaram características de concretos leves, com desempenho mecânico e rigidez satisfatórios, podendo ser aplicados em estruturas e painéis de fechamento.

PALAVRAS-CHAVES: Bioconcretos, bioagregados, casca de arroz.

ABSTRACT: Agro-industrial waste can be attractive for the use as construction aggregate. The purpose of this study was to evaluate a low content of rice husk as bioaggregate in concrete. An experimental study was performed with this waste in raw and treated form (1%, by volume) as fine aggregate, and the incorporation of rice husk-ash in partial substitution to cement (8%, by weight). Drying shrinkage and mechanical properties were evaluated up to 6 months. The results demonstrated the achievement of lightweight bioconcretes with satisfactory mechanical properties and stiffness, being able to be applied in structures and closure panels.

KEYWORDS: Bioconcrete, bioaggregate, rice husk.

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos cresceu o número de estudos sobre os impactos ambientais e o consumo de matéria-prima não recicláveis nas construções. Como exemplos, pode-se citar o consumo de 590 milhões de toneladas de agregados no Brasil (1) e a emissão de cerca 600 kg de CO_2/ton de cimento, em 2018 (2).

Diante deste contexto, é necessário o estudo de materiais recicláveis em substituição aos comumente empregados pela construção civil. A agroindústria gera grande quantidade de resíduos e, dentre eles, destaca-se a casca de arroz (CA), um resíduo sem fim nutritivo que faz a cobertura do grão. Segundo dados do *Foreign Agricultural Service* (3), a produção mundial anual de arroz em 2020 foi de cerca de 500 milhões de toneladas e os resíduos usualmente são calcinados para geração de energia, ou descartados. A reutilização deste material como bioagregado é recente e estudos descrevem que a incorporação da CA

em concretos resulta em materiais leves e isolantes [4][5][6], embora exista redução do desempenho mecânico para elevados teores [7][8].

A CA é composta por celulose (40% a 50%), lignina (25% a 30%), matéria inorgânica (aproximadamente 20%) e sílica. Estudos sugerem que a matéria extrativa presente nos bioagregados pode conter constituintes solúveis que, ao serem incorporados na água de amassamento, solubilizam açúcares e outros inibidores que afetam a pega e a cinética de hidratação do cimento [4][9][10].

A fim de minorar este comportamento, alguns pesquisadores sugerem o tratamento de bioagregados por meio de imersão e lavagem da biomassa com água em temperatura ambiente ou aquecida, ou ainda contendo solução de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) [10][11][12][13].

Na busca por materiais alternativos para a construção, nesta pesquisa foi estudada a influência do uso de um baixo teor de CA *in natura* e tratada como bioagregado miúdo, e a substituição parcial do cimento por cinza da casca de arroz (CCA) no concreto.

2 | PROGRAMAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Este estudo utilizou o cimento CP-V ARI e a substituição, em massa, de 8% do cimento por CCA. Os agregados utilizados são de origem granítica e potencialmente inócuos para a reação álcali-sílica (conforme ABNT NBR 15577). Nas dosagens dos bioconcretos houve a substituição parcial (em volume) de 1% de agregado miúdo por CA, teores adotados com base em estudos realizados [7][14]. Utilizou-se aditivo polifuncional modificador de viscosidade, com as seguintes propriedades físicas: pH = 5,41; teor de sólidos = 43,97%; densidade = 1,187 g/cm³.

Na Figura 1 são apresentadas micrografias por microscopia eletrônica por varredura (MEV) da CA e CCA, respectivamente. Observando-se a Figura 1(a), percebe-se a superfície rugosa e tubular da CA, contendo diversos poros, da CA. A CCA possui distribuição granulométrica uniforme e fina, com formato semelhante para todos os grãos (Figura 1(b)).

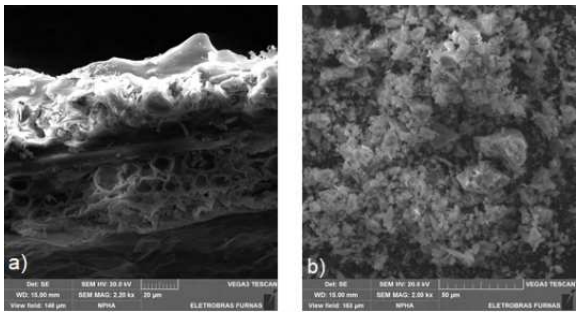


Figura 1 – Micrografias obtidas por MEV: a) CA; b) CCA.

Fonte: Furnas (2021).

2.2 Produção dos concretos e ensaios realizados

Foram confeccionados corpos de provas cilíndricos (10 x 20 cm) para as análises mecânicas de tração diametral, compressão e módulo de elasticidade até a idade de 180 dias. Para determinação da retração por secagem, ao longo de 90 dias, foram empregados corpos de prova prismáticos (7,5 x 7,5 x 28,5 cm). Foi realizado de forma complementar o ensaio de rigidez denominado SDT [15]. O traço empregado no concreto da pesquisa foi de 1:2,23:3,08:0,58 (cimento:areia:brita:relação água cimento), em massa.

Foram avaliadas 3 condições, a saber: concreto de referência, produzido sem a CA (C.REF-0); concreto com 1% de casca em substituição ao agregado miúdo, sendo a casca *in natura* (BC.CCA/CA-1); concreto com 1% de casca tratada, em substituição ao agregado miúdo (BC.CCA/CA.TRAT-1).

O tratamento consistiu na submersão e agitação da CA em água saturada com $Ca(OH)_2$, à temperatura ambiente, durante 1 hora, seguido por secagem em estufa a 90°C, por 24 horas. A escolha da solução contendo $Ca(OH)_2$ foi feita com base no estudo de Ferreira [12] e de Iwakiri *et al*. [11] que obtiveram alterações na morfologia da CA com tratamento contendo $Ca(OH)_2$.

3 | RESULTADOS

3.1 Propriedades físicas

Na Figura 2 estão apresentados os resultados de retração por secagem dos concretos. Verifica-se menor retração nos bioconcretos, atingindo reduções de até 47% e 58% aos 90 dias para 1% de CA com e sem tratamento em relação à referência, idade em que estabilizou a retração. Além disso, houve menores retrações em idades iniciais para os bioconcretos. Genieva *et al*. [16] descrevem que a superfície tubular e porosidade interna do grão alivia a retração a poucas idades. Ainda, Nozahic *et al*. [17] relatam que a remoção de extrativos e o acúmulo de $Ca(OH)_2$, na superfície, auxilia na melhor aderência matriz/bioagregado.

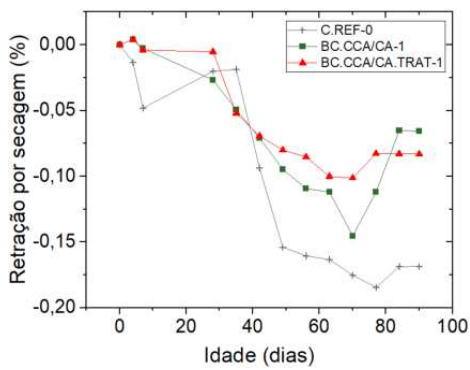


Figura 2 – Resultados de retração por secagem até os 90 dias de idade.

3.2 Propriedades mecânicas dos concretos

Os resultados de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade são apresentados na Figura 3.

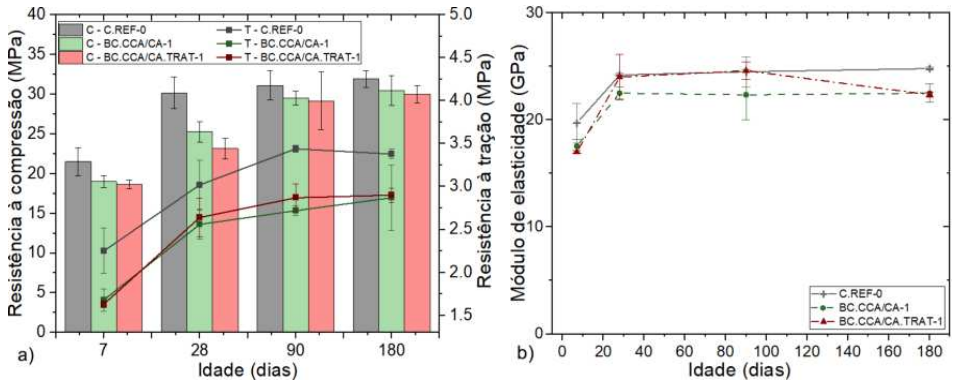


Figura 3 – Resultados mecânicos para: a) Resistência à compressão (C) e à tração (T); b) Módulo de elasticidade dos concretos estudados.

Verifica-se uma maior resistência à compressão do concreto de referência, sendo a diferença mais expressiva até os 28 dias (16% CA *in natura* e 23% CA tratada). Já para as idades mais avançadas estudadas, de 90 e 180 dias, as diferenças são bem inferiores, e da ordem de 5% (independente da condição) em comparação à referência. Ainda, o concreto referencial resultou em maiores resistências à tração ao longo de todas as idades avaliadas, e da ordem de 15% aos 180 dias, quando comparada aos concretos com a CA, independente se tratada ou não.

Comportamentos semelhantes ao deste estudo foram obtidos e apresentados na literatura, com o emprego de CA, variando entre 2,5% a 7,5% [8;18]. Alguns estudos apresentam reduções de resistência à compressão na ordem de 10% com a incorporação de 3% de CA [9] e 20% para 5% de CA [19].

Em relação ao tratamento realizado na casca, os resultados de resistência à compressão obtidos indicaram que não houve diferenças significativas (ANOVA) para todas as idades, exceto aos 28 dias, idade na qual a resistência à compressão do bioconcreto com a CA tratada foi 8% inferior à do bioconcreto contendo CA *in natura*. Aos 90 dias, o concreto contendo CA tratada apresentou resistência à tração 6% superior ao bioconcreto convencional.

No que diz respeito ao ensaio SDT e o índice de rigidez (SDI) obtido para os concretos na idade de 180 dias, observa-se um menor índice para aquele concreto contendo a CA tratada (SDI = 0,157) em comparação ao concreto com a CA, sem tratamento (SDI = 0,185), mostrando benefícios do tratamento nesse sentido.

Em relação ao módulo de elasticidade, as amostras contendo CA sem tratamento apresentaram valores inferiores àqueles da referência (cerca de 9%). Quando a CA tratada foi utilizada, um comportamento similar foi observado para as idades de 7 e 180

dias, enquanto essa propriedade se mostrou similar à da amostra de referência para as idades de 28 e 90 dias.

Alguma redução no módulo de elasticidade era esperada, uma vez que quem rege essa propriedade prioritariamente é o agregado. Eventualmente alguma fragilização na zona de transição entre a matriz cimentícia e o bioagregados pode também ocorrer. A densidade e a porosidade dos bioagregados influenciam na rigidez do concreto devido à sua estrutura tubular e porosa. Estudos utilizando bioagregados oriundos de bambu [20] e casca de arroz[10] corroboram com a redução de rigidez do bioconcreto.

Uma melhora na aderência bioagregado/matriz cimentícia, oriunda da remoção de extrativos da CA, são descritos na literatura, onde foi constatado que aumenta a rigidez da microestrutura tubular da casca e a aderência dos grãos, comparado aos bioagregados sem tratamento [21].

Embora Chabannes *et al.* [22] e Pantawe *et al*. [23] tenham obtido melhorias mecânicas realizando o tratamento superficial do bioagregado com $Ca(OH)_2$, Salas *et al*. [24], que também estudaram CA, e Chabannes *et al*. [25], que estudaram cânhamo, demonstraram comportamentos semelhantes aos observados no presente estudo, ou seja, sem benefícios significativos nas propriedades mecânicas em função do tratamento superficial dos bioagregados.

4 | CONSIDERAÇÕES

O estudo da incorporação de baixos teores de bioagregado (CA) resultou em bioconcretos com desempenho mecânico satisfatório ao longo das idades avaliadas e aplicáveis a estruturas leves e elementos de fechamento. Os resultados do estudo permitem as seguintes considerações:

- A incorporação da 1% de CA em substituição ao agregado miúdo conferiu resistência à compressão 5% inferior ao referencial, e resistência à tração 15% inferior, ambos na idade final analisada (180 dias).
- O tratamento superficial não resultou em benefícios para a resistência à compressão, não havendo diferenças significativas ao longo do tempo (até 180 dias). Entre 28 e 90 dias o bioconcreto com a CA tratada apresentou resistência à tração superior ao sem tratamento; já aos 180 dias, os valores foram semelhantes. Mais estudos são necessários para o completo entendimento dos mecanismos envolvidos nessa propriedade.
- O módulo de elasticidade do bioconcreto com CA tratada mostrou comportamento semelhante ao concreto sem o bioagregado até os 90 dias de idade, e superior ao bioconcreto *in natura*, mostrando o efeito positivo do tratamento realizado.
- A superfície rugosa, porosa e tubular da casca de arroz contribuiu para uma melhor aderência do bioagregado à matriz cimentícia, que não teve comprometimento do desempenho mecânico, apesar de sua baixa rigidez. Ainda, a remoção de extrativos e o tratamento com hidróxido de cálcio melhorou esse comportamento.
- Este estudo permitiu verificar que o tratamento superficial da CA demons-

trou potencial para a modificação de rigidez do bioconcreto, contribuindo com o aumento do módulo de elasticidade, juntamente com ganhos na resistência à tração.

AGRADECIMENTO

Este trabalho faz parte do projeto de P&D "Uso de bio-concretos e bio-MMFS de baixo impacto ambiental visando o aumento da eficiência energética de prédios públicos" - PD.0394-1719/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e UFRJ. Os autores agradecem a Furnas, UFRJ e IMED pela infraestrutura, além do suporte no mestrado do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

1. Areia e brita. São Paulo: Anepac, v. 76, dez. 2020.

2. GCCA. **GNR – GCCA in Numbers**. 2018. Disponível em: https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/. Acesso em: 17 abr. 2021.

3. FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE. United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production.** 2020. Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/world-agricultural-production. Acesso em: 20 abr. 2021.

4. CHABANNES, M.; BÉNÉZET, J.; CLERC, L. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 428-438, 27 ago. 2014.

5. BAKATOVICH, A.; DAVYDENKO, N.; GASPAR, F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. **Energy & Buildings**, v. 180, p. 72-82, 26 set. 2018.

6. BURATTI, C.; BELLONI, E.; LASCARO, E. Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 338-349, 26 mar. 2018.

7. YUZER, N.; CINAR, Z.; AKOZ, F. Influence of raw rice husk addition on structure and properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 54-62, 03 abr. 2013.

8. SISMAN, C. B.; GEZER, E.; KOCAMAN, I. Effects of organic waste (rice husk) on the concrete properties for farm buildings. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 17, p.40-48, fev. 2011.

9. DIQUÉLOU, Y.; GOURLAY, E.; ARNAUD, L. Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. **Cement & Concrete Composites**, v. 55, p. 112-121, 20 set. 2014.

10. SANTOS, D. O. J. dos. **Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2020.

11. IWAKIRI, S.; SILVA, L. S. da; TRIANOSKI, R. Avaliação do potencial de utilização da madeira de Schizolobium Amazonicum 303 "Paricá" e Cecropia Hololeuca "embaúba" para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, v. 18, p. 303-308, jun. 2012.

12. FERREIRA, R. S. **Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

13. PINTO, M. C. **Influência da temperatura e de tratamentos alcalinos na remoção dos extrativos da biomassa de madeira e seus efeitos na hidratação de pastas de cimento e de bioconcreto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.

14. SOUZA, J. de. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz.** 2008. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

15. HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. F. M. SDT - Método de ensaio para a determinação do índice de dano de rigidez (SDI) e índice de deformação plástica (PDI) em concretos - **Instrução Técnica ITDSBE001.** 15p. Furnas, 2021.

16. GENIEVA, S. D.; TURMANOVA, S. C.; DIMITROVA, A. S. Characterization of rice husks and the products of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 93, p. 387-396, 22 jul. 2008.

17. NOZAHIC, V.; AMZIANE, S. Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, p. 1837-1849, 30 jul. 2012.

18. PAKRAVAN, H. R.; JAMSHIDI, M.; JEDDI, A. A. Asgharian. Combination of ground rice husk and polyvinyl alcohol fiber in cementitious composite. **Journal of Environmental Management**, v. 2015, p.116-122, 19 mar. 2018.

19. WANG, R.; QIN, L.; GAO, X. Mechanical strength and water resistance of magnesium oxysulfate cement based lightweight materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 109, p. 1-11, 06 fev. 2020.

20. ANDREOLA, V. M. **Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

21. LIU, J.; LI, F.; LIU, X. Experimental Study in the Modification of Mortar Samples with Incorporated Rice Husk. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, p.967-973, maio 2017.

22. CHABANNES, M.; BECQUART, F.; GARCIA-DIAZ, E. Experimental investigation of the shear behaviour of hemp and rice husk-based concretes using triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 143, p.621-632, 27 mar. 2017.

23. PANTAWE, S.; SINSIRI, T.; JATURAPITAKKUL, C. Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminum sulfate [Al2(SO4)3] and hydrated lime [Ca(OH)2] treatment. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 435-442, 26 set. 2017.

24. SALAS, J.; ALVAREZ, M.; VERAS, J. Lightweight insulating concretes with rice husk. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 8, p. 171-180, ago. 1986.

25. CHABANNES, M.; GARCIA-DIAZ, E.; CLERC, L. Effect of curing conditions and Ca(OH)2-treated aggregates on mechanical properties of rice husk and hemp concretes using a lime-based binder. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 821-833, 18 nov. 2015.



CAPÍTULO 25

ANÁLISE DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RESÍDUO DE MARMORARIA EM DIFERENTES FATORES ÁGUA CIMENTO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081125

ALMADA, BRUNA S.[1]; SANTOS, WHITE J.[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: BRUNAALMADA@UFMG.BR

RESUMO: Avaliou-se a durabilidade de argamassas estruturais com a substituição de cimento por Resíduo de Mármore e Granito (RMG), em diferentes fatores a/c, fixando-se a trabalhabilidade com uso de aditivo plastificante. Estudou-se a absorção por imersão, porosidade, resistência à compressão, resistividade elétrica e carbonatação acelerada. Constatou-se que o resíduo e o aditivo plastificante promoveram um refinamento da estrutura, aumento do coeficiente de capilaridade e ganho de resistividade elétrica. Contudo, a redução da alcalinidade ocorrida pela substituição do cimento por um material inerte foi prejudicial à resistência à carbonatação.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduo de marmore e granito, durabilidade, compósitos cimentícios.

ABSTRACT: The durability of structural mortars was evaluated with the replacement of cement by Marble and Granite Waste (MGW), in different w/c factors, fixing the workability with the use of a plasticizer additive. Absorption by immersion, porosity, compressive strength, electrical resistivity and accelerated carbonation were studied. It was found that the residue and the plasticizer additive promoted a refinement of the structure, increased capillary coefficient and gain in electrical resistivity. However, the reduction in alkalinity caused by the replacement of cement by an inert material was detrimental to its resistance to carbonation.

KEYWORDS: Marble and granite residue, durability, cementitious composites.

1 | INSTRUÇÕES GERAIS

O setor de mineração e beneficiamento de rochas ornamentais tem apresentando crescimento, tendo em vista as diversas aplicações dos materiais. Nesse contexto, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores e exportadores de rochas ornamentais. Segundo o Boletim Informativo da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais(1) o Brasil é o terceiro maior exportador mundial de ardósia e o segundo maior exportador de blocos de granito. Apesar disso, o setor também está associado a uma problemática ambiental, devido à geração de resíduos durante o processo de extração e beneficiamento das rochas ornamentais, que é estimada em cerca de 20 a 30% da matéria prima(2). Por outro lado, a indústria da construção civil é uma das principais consumidoras de subprodutos industriais, utilizando materiais alternativos na produção de compósitos e contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, muitos estudos têm sido realizados buscando o reaproveitamento do resíduo de mármore e granito (RMG) em compósitos cimentícios, indicando que este material

apresenta muito baixa atividade pozolânica, mas pode atuar como filer, melhorando algumas propriedades dos compósitos[2,3]. Portanto, por ser constituído de pó de pedra fino, o RMG apresenta potencial de utilização como substituinte parcial do cimento.

A busca por materiais mais duráveis está comumente ligada a estudos com a redução do fator a/c, pois este afeta a porosidade e permeabilidade de concretos e argamassas, determinando sua microestrutura, distribuição e forma dos poros[4,5]. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é a avaliação do efeito da substituição de cimento por RMG, em indicadores de durabilidade de argamassas em diferentes fatores a/c, fixando-se a trabalhabilidade através do uso de aditivo plastificante.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, foram produzidas duas argamassas de referência, com e sem aditivo plastificante (REF-P e REF) e duas argamassas contendo 20% de RMG como substituinte parcial do cimento, com e sem aditivo (RMG-P e RMG). Foi utilizado cimento Portland CPI, por não conter adições, permitindo uma melhor avaliação da influência do RMG como substituinte do cimento; areia padrão normal, fornecida pelo Instituto de Pesquisa e Tecnologia de São Paulo e aditivo redutor de água do tipo plastificante multifuncional de pega normal, Muraplast FK 97 MC Bauchemie. O resíduo coletado na forma de lama é oriundo do beneficiamento à úmido de chapas de rochas ornamentais em uma marmoraria localizada na região Norte de Belo Horizonte/MG. Essa lama foi levada à estufa na temperatura de 105 ± 5 °C, destorroada manualmente e passada em peneira de abertura de 75 µm. A amostra de RMG apresentou massa específica de 2,67 g/cm³, valor próximo ao observado em estudos anteriores[2,3]. A composição química do RMG, demonstrou que o resíduo é composto principalmente por SiO_2, apresentando menor quantidade de CaO, o que demostra que este RMG advém, principalmente, do beneficiamento de rochas graníticas[2]. A composição granulométrica apresentou D_{90} = 41,7 µm e D_{50} = 12,0 µm, o que indica que o resíduo pode atuar como filer.

Após a caracterização dos materiais, foram moldadas as argamassas, tendo como relação entre o material aglomerante e a areia 1:3, conforme consumo de materiais apresentado na Tabela 1. Em análises prévias, observou-se que a introdução do RMG afetou pouco a trabalhabilidade. Assim, para a dosagem das argamassas sem aditivo plastificante, foi definido o fator água/cimento de 0,50. E, para as argamassas contendo o aditivo, fixaram-se o teor do plastificante em 1% em relação a massa de aglomerante - valor máximo permitido pelo fabricante - e o índice de consistência obtido nas amostras de referência (173 ± 10 mm), dosando-se a quantidade de água. Observou-se que o aditivo foi levemente mais eficiente na mistura com RMG, que apresentou menor teor de água. Em seguida, executaram-se os ensaios de acordo com as normas apresentadas na Tabela 2.

ID	Cimento (kg/m³)	Resíduo (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Relação a/c
REF	509,08	-	1527,25	254,54	-	0,500
REF - P	520,35	-	1561,05	233,64	5,20	0,449
RMG	404,63	101,16	1517,36	252,89	-	0,500
RMG - P	415,89	103,97	1559,58	227,70	5,20	0,438

Tabela 1 - Consumo de materiais por m³ de argamassa.

Ensaio	Norma	Observação
Absorção de água por imersão e porosidade	NBR 9778-79[6,7]	-
Resistência à compressão	NBR 5739[8]	28 dias de cura
Carbonatação acelerada	ISO 1920-12[9]	60 dias em câmara de carbonatação
Resistividade Elétrica	NBR 9204[10]	Amostra saturado – 48 horas

Tabela 2 – Normas dos ensaios realizados.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à compressão

Observa-se nos resultados do ensaio de resistência à compressão (Figura 1) que as maiores resistências mecânicas foram alcançadas pelas argamassas contendo aditivo, devido à redução do fator a/c. O ganho de resistência das amostras REF-P e RMG-P, em relação à argamassa REF, foi de 11,19% e 10,18%, respectivamente. Apesar da menor relação a/c e de apresentar efeito filer do resíduo, a argamassa RMG-P não obteve resultado superior à REF-P. Isso se deve, provavelmente, à redução dos componentes responsáveis pela resistência mecânica do compósito ao substituir o cimento pelo RMG (material inerte), conforme apresenta a literatura[2].

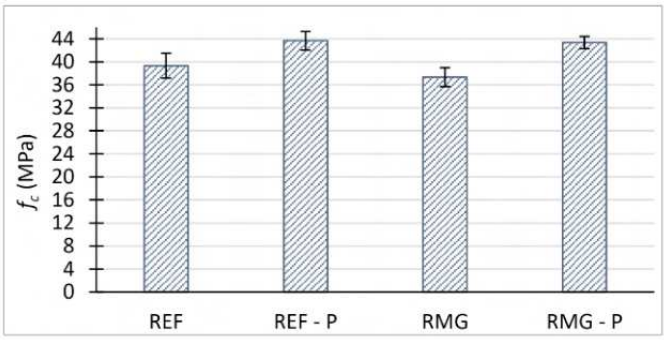


Figura 1 – Resultado de resistência à compressão (f_c) aos 28 dias.

3.2 Absorção de água por imersão, capilaridade e porosidade

Na Figura 2 estão apresentadas as porosidades aberta e total, o coeficiente de capilaridade e a absorção por imersão das amostras. Os resultados indicam que os menores valores de absorção por imersão e porosidades foram obtidos pelas argamassas contendo aditivo plastificante. Enquanto que o menor coeficiente de capilaridade foi obtido pela argamassa de referência.

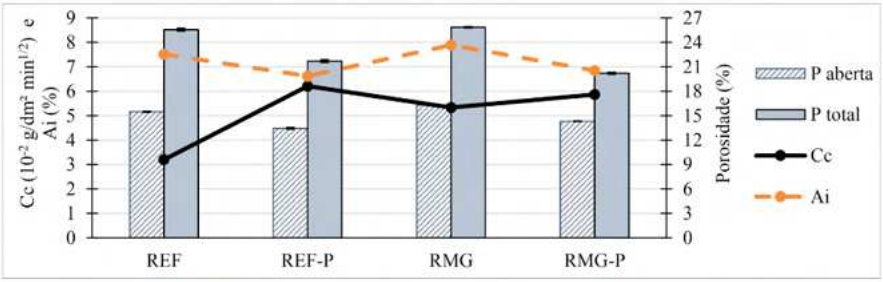


Figura 2 - Resultado da absorção por imersão (Ai), coeficiente de capilaridade (Cc) e porosidade (P).

Comparando as argamassas de mesmo fator a/c (REF e RMG), observa-se um aumento de 19,18% na absorção de água da amostra RMG, embora sua porosidade total tenha aumentado apenas 1,13% (não representativo). Esse resultado indica que, para a relação a/c utilizada, a substituição de 20% do cimento por RMG não é benéfica em relação à permeabilidade dos compósitos cimentícios. Esse aumento de permeabilidade também é representado pelo maior coeficiente de capilaridade dessa amostra. De forma geral, os resultados sugerem que a amostra REF apresentou grande volume de vazios, mas menor número de poros capilares comunicantes, enquanto a amostra RMG apresentou uma estrutura mais refinada e de vazios interligados, embora com volume de vazios semelhante à amostra anterior. As amostras REF-P e RMG-P apresentam menor quantidade de vazios e poros de menores dimensões. Para sustentar as justificativas, foram feitas imagens da porosidade interna dos corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção, com lupa de ampliação de até 1000x, como mostra a Figura 3.

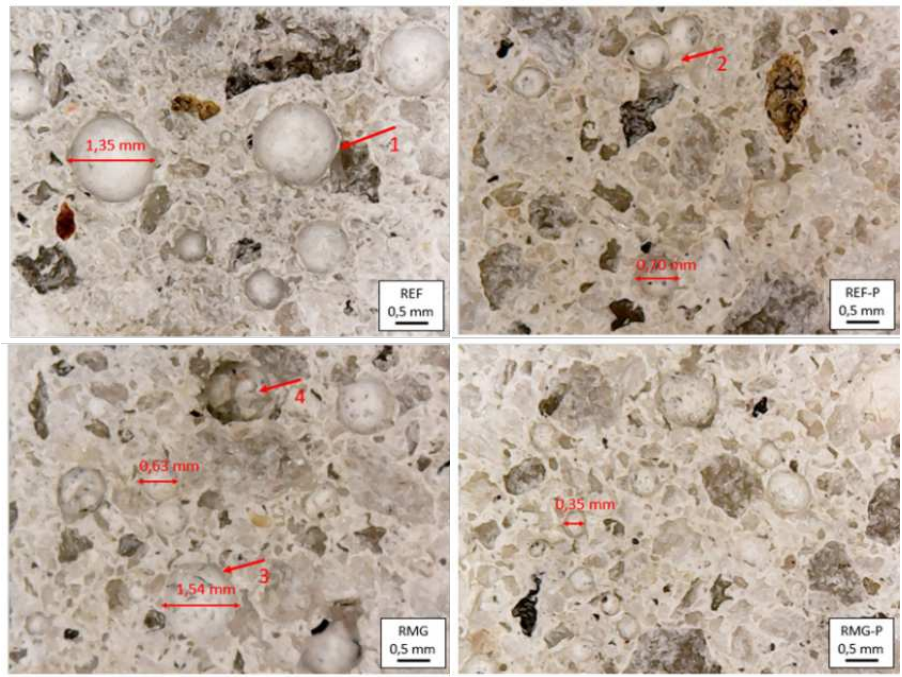


Figura 3 - Fotos da porosidade interna das argamassas.

De forma geral, observa-se que, para a argamassa REF, há poros maiores, com dimensões de até 1,35 mm e mais distantes uns dos outros. No ponto 1, percebe-se que o poro se formou próximo da zona de transição pasta-agregado, indicando uma região de enfraquecimento que pode afetar a resistência mecânica do material. Comparando-se as argamassas contendo resíduo (RMG e RMG-P), a redução da quantidade de água e o melhor empacotamento de partículas da argamassa RMG-P resultou em um compósito mais compacto, com poros menores (0,35 mm) e mais bem distribuídos, o que contribuiu com o ganho de resistência de 16,08% apresentado na Figura 1. Da mesma maneira, na amostra REF-P, nota-se uma maior quantidade de poros menores, de aproximadamente 0,70 mm, confirmando o refinamento provocado pela utilização do plastificante e redução da quantidade de água. Contudo, ainda foi possível observar poros interconectados, como indica o ponto 2. A introdução do resíduo também reduziu o tamanho dos poros na argamassa RMG para dimensões de aproximadamente 0,60 mm. Entretanto, poros maiores e mais profundos foram identificados (pontos 3 e 4), o que corrobora com a maior porosidade resultante da amostra.

3.3 Carbonatação acelerada

Na Figura 4 (a) são apresentados os resultados de carbonatação e, na Figura 4 (b), as fotos dos corpos de prova após aspersão de solução de fenolftaleína.

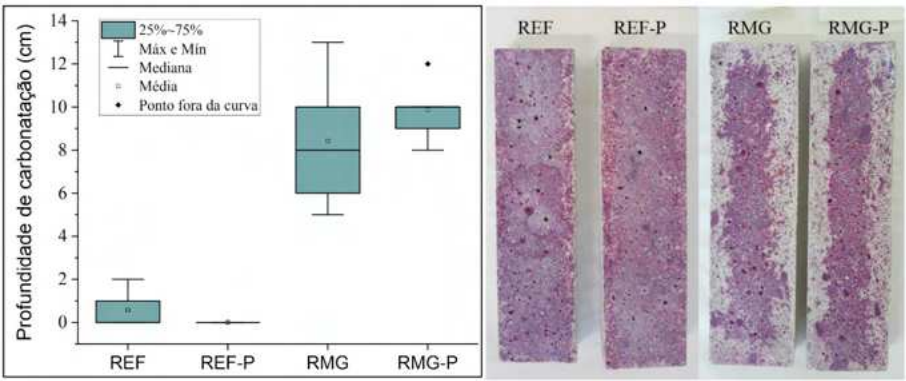


Figura 4 - (a) Profundidade de carbonatação das amostras (b) foto dos corpos de prova carbonatados

As amostras de referência (REF e REF-P) não apresentaram carbonatação representativa após os 60 dias na câmara, ainda que houvesse uma diferença de 15,08% entre as porosidades totais. Nas amostras com resíduo (RMG e RMG-P), que apresentaram diferença de 21,81% na porosidade total, foi identificada uma grande profundidade de carbonatação para ambas as amostras. Entretanto, a amostra RMG-P apresentou uma frente de carbonatação mais homogênea. Esse resultado pode ser atribuído ao fato da substituição do cimento pelo resíduo ter reduzido o teor de $Ca(OH)_2$ durante o processo de hidratação[2]. Apesar da redução da porosidade causada pelo efeito filer do RMG, a redução da alcalinidade da argamassa foi mais decisiva para essa propriedade.

3.4 Resistividade elétrica

A durabilidade dos compósitos cimentícios pode ser avaliada medindo-se sua resistividade elétrica, que indica o potencial de corrosão de armaduras[11]. Pelos resultados (Figura 5), é possível perceber que a resistividade elétrica seguiu o comportamento inverso da porosidade e as amostras com plastificante (REF-P e RMG-P) quando comparadas à REF, apresentaram resistividade elétrica superior, 49,67% e 20,16%, respectivamente. Isso se deve ao fator a/c, que é inversamente proporcional à resistividade[12].

A substituição do cimento pelo resíduo reduz o teor de $Ca(OH)_2$ na mistura, diminuindo a quantidade de íons OH^- na solução dos poros e, consequentemente, sua condutância[13]. Dessa forma, a resistividade elétrica de compostos contendo RMG deveria ser maior que o de referência. Contudo, comparando as amostras REF e RMG, nota-se que não houve uma influência significativa do resíduo nesta propriedade, que resultou em uma redução de apenas 3,06%. Isso indica que a permeabilidade foi um fator mais determinante para a resistividade que a composição química da solução nos poros.

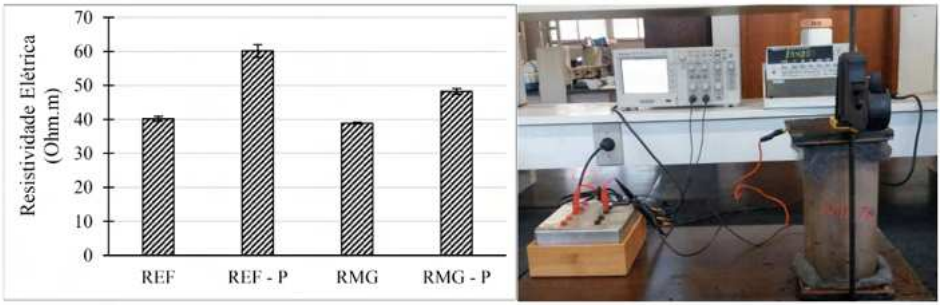


Figura 5 - Resultado de resistividade elétrica

4 | CONCLUSÕES

Com o estudo, foi possível concluir que a inserção do resíduo e do aditivo plastificante promoveram um refinamento da estrutura porosa e aumento do coeficiente de capilaridade, com manutenção da resistência nas misturas com aditivo plastificante. Apesar das alterações na estrutura porosa causadas tanto pelo resíduo quanto pelo aditivo plastificante, a redução da alcalinidade do compósito pela substituição do cimento por um material inerte foi mais prejudicial à resistência à carbonatação. Por outro lado, em relação à resistividade elétrica, a microestrutura porosa se mostrou mais importante que a alteração da condutividade da solução dos poros pela redução da alcalinidade dos compósitos com resíduo. De forma geral, observa-se que o uso do RMF é mais eficiente em relações água/cimento mais baixas e sua utilização como filer, promove melhor empacotamento de partículas, contribuindo positivamente para a maioria das propriedades. Entretanto, o teor de substituição foi elevado, podendo ser prejudicial à algumas propriedades relacionadas à durabilidade dos compósitos.

REFERÊNCIAS

1. ABIROCHAS. O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais, julho de 2018. Disponível em: http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Cenario_Mundial_2017.pdf. Acesso em: 25/09/18.

2. Almada, B.S.; Luciane, S.M.; Dutra, J.B.; Bubani, L.C.; Silva, G.J.B.; Santos, W.J.; Aguilar, M.T.P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites, **Construction and Building Materials**, V. 262, 2020.

3. ALIABDO A.A., ELMOATY A.M., AUDA E. M., Re-Use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete. **Construction and Building Materials**, no 50 p. 28–41, 2014.

4. KHODABAKHSHIAN A., GHALEHNOVI M., BRITO J. DE, SHAMSABADI E. A., Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder, **Journal of Cleaner Production**, v.170, p. 42-60, 2018.

5. SARDINHA M., BRITO, J de, RODRIGUES R., Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge, **Construction and Building Materials**, v.119, p. 45-52, 2016.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, Rio de Janeiro, 2005.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2012.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS .**ABNT NBR 9204**: Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

10. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1920**: Testing of concrete. Determination of the carbonation resistance of concrete. Accelerated carbonation method, 2015.

11. SILVA P. C., FERREIRA R. M., FIGUEIRAS H., **Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure**. International Conference on Durability of Building Materials and Components - XII DBMC, Porto – Portugal, 2011.

12. SARDINHA M., BRITO, J de, RODRIGUES R., Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge, **Construction and Building Materials**, v.119, p. 45-52, 2016.

13. 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.



CAPÍTULO 26

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RESÍDUO DE MARMORARIA COM FIXAÇÃO DA TRABALHABILIDADE PELO USO DE ADITIVOS PLASTIFICANTE

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081126

ALMADA, BRUNA S.[1]; SANTOS, WHITE J.[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: BRUNAALMADA@UFMG.BR

RESUMO: Estudou-se o efeito da substituição de cimento por 20% de resíduo de mármore e granito (RMG) em diferentes fatores água/cimento (a/c), fixando-se a trabalhabilidade com uso de aditivo plastificante. Confeccionaram-se argamassas com e sem aditivo plastificante, avaliando a trabalhabilidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção de água por capilaridade. Observou-se maior influência do resíduo em relações a/c mais baixas, refinando a estrutura porosa, devido ao efeito filer. A resistência à compressão foi elevada no menor fator a/c e não houve influência representativa no módulo de elasticidade das argamassas.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduo de marmore e granito, aproveitamento de resíduo, compósitos cimentícios.

ABSTRACT: The effect of replacing cement by 20% marble and granite waste (MGW) in different water/cement factors (w/c) was studied, fixing the workability with the use of plasticizer additive. Mortars were made with and without plasticizer additive, evaluating the workability, compressive strength, dynamic modulus of elasticity and capillary water absorption. There was a greater influence of the waste at lower w/c ratios, refining the porous structure, due to the filer effect. The compressive strength was high at the lowest w/c ratio and there was no representative influence on the modulus of elasticity of the mortars.

KEYWORDS: Marble and granite waste, waste reuse, cementitious composites.

1 | INSTRUÇÕES GERAIS

A indústria da construção civil é uma das principais consumidoras de recursos naturais e geradoras de resíduos que podem causar grandes impactos ambientais. Dessa forma, a utilização de materiais alternativos pode contribuir para o desenvolvimento sustentável, reduzindo a degradação ambiental provocada pelos resíduos e prolongando as reservas de materiais naturais. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento(1), de janeiro de 2017 a fevereiro de 2018, o Brasil produziu quase 54 milhões de toneladas de cimento, contribuindo negativamente com a emissão de CO_2 na atmosfera. Aliado a isto, ressalta-se que o país ocupa posição de destaque na produção de rochas ornamentais, cujo processo de extração e beneficiamento gera grande volume de resíduos, estimado em cerca de 20 a 30% da matéria prima(2-3). Durante o processo de corte a úmido, as chapas de rochas ornamentais, como granito e mármore, sofrem desgaste, o que resulta na formação de uma lama acinzentada, também chamada de

lama abrasiva e que, quando seca, gera um resíduo em pó fino. Os principais impactos gerados pela disposição inadequada dessa lama a contaminação do solo e do lençol freático, alteração da cadeia biológica de seres vivos e assoreamento de rios[2,4].

Nesse contexto, muitos estudos têm sido realizados buscando o reaproveitamento do resíduo de mármore e granito (RMG) em compósitos cimentícios. Esses estudos mostram que o RMG não apresenta, ou apresenta muito baixa atividade pozolânica, mas pode atuar como filer, melhorando algumas propriedades dos compósitos[2, 4-5]. Portanto, por ser constituído de pó de pedra fino, o RMG apresenta potencial de utilização como substituinte parcial do cimento, sendo uma alternativa de reinserção do resíduo na produção de outro produto. Para que sua utilização seja feita de forma eficiente, deve-se estudar a influência da quantidade de água na mistura, definindo-se, assim, fatores a/c adequados, que proporcionarão melhor desempenho mecânico e durabilidade de compósitos cimentícios com a introdução de RMG. O objetivo geral deste trabalho é a avaliação, em laboratório, do efeito da substituição de cimento por resíduo de mármore e granito em diferentes fatores a/c, fixando a trabalhabilidade através do uso de aditivo plastificante.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidos quatro tipos de argamassas: duas de referência, com e sem aditivo plastificante (REF-P e REF, respectivamente) e duas com substituição de 20% do cimento por resíduo de mármore e granito, com e sem aditivo plastificante (RMG-P e RMG, respectivamente). Foi utilizado cimento Portland CPI (disponibilizado por uma cimenteira), por não conter adições, permitindo uma melhor avaliação da influência do RMG como substituinte do cimento; areia padrão normal, fornecida pelo Instituto de Pesquisa e Tecnologia de São Paulo e aditivo redutor de água do tipo plastificante multifuncional de pega normal, Muraplast FK 97 MC Bauchemie. O resíduo coletado na forma de lama é oriundo do beneficiamento à úmido de chapas de rochas ornamentais em uma marmoraria localizada na região Norte de Belo Horizonte/MG. Essa lama foi levada à estufa na temperatura de 105± 5°C para desidratação completa, até constância de massa. Após a secagem, a amostra foi destorroada manualmente e passada em peneira de abertura de 75 µm. O resíduo foi caracterizado quanto a composição granulométrica, por granulometria à laser, massa específica por picnômetro à hélio e composição química por fluorescência de raios-X (FRX).

Após a caracterização dos materiais, foram moldadas as argamassas para avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido: trabalhabilidade[6], absorção de água por capilaridade[7], porosidade[8], resistência à compressão[9]e módulo de elasticidade[10] aos 28 dias. Em todos os casos, a relação entre o material aglomerante e a areia foi de 1:3, em massa, conforme consumo de materiais apresentado na Tabela 1. Para as argamassas sem aditivo plastificante, foi definido o fator água/cimento de 0,50 e, para as argamassas contendo o aditivo, fixou-se o teor do plastificante em 1% em relação a massa de aglomerante, valor máximo permitido pelo fabricante. A dosagem da quantidade de água foi realizada, então, fixando-se o índice de consistência em 173 ± 10 mm, valor de espalhamento obtido pela amostra de referência (REF).

ID	Cimento (kg/m³)	Resíduo (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Relação a/c
REF	509,08	-	1527,25	254,54	-	0,500
REF - P	520,35	-	1561,05	233,64	5,20	0,449
RMG	404,63	101,16	1517,36	252,89	-	0,500
RMG - P	415,89	103,97	1559,58	227,70	5,20	0,438

Tabela 1 - Consumo de materiais por m³ de argamassa.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do RMG

No ensaio para determinação da massa específica obteve-se como resultado 2,67 g/cm³, valor dentro dos que é observado em estudos anteriores[2,4,5]. Os resultados da composição química do RMG, apresentados na Tabela 2Tabela , demonstram que, diferentemente do cimento, o resíduo é composto principalmente por SiO_2, apresentando menor quantidade de CaO. Isso mostra que o RMG coletado advém do beneficiamento de um número maior de rochas do tipo granito[2].

FeO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	K_2O	MnO	PF
1,67	42,80	8,07	2,63	19,00	3,89	0,69	0,33	1,85	2,59	0,04	17,40

PF – Perda ao fogo.

Tabela 2 - Composição química do RMG (%).

Quanto à composição granulométrica, apresentada na Figura 1, observa-se que D_{90} = 41,7 µm e D_{50} = 12,0 µm, indicando que o resíduo pode atuar como filer. Conforme afirma Almada[2], as partículas do RMG nessa faixa granulométrica podem contribuir com uma maior superfície disponível para hidratação, atuando como pontos de nucleação para os grãos de cimento, além de favorecerem o empacotamento.

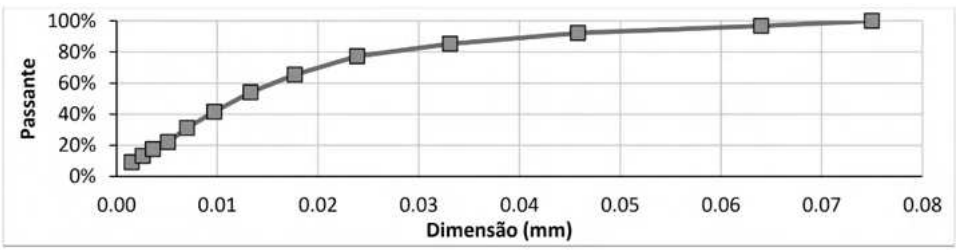


Figura 1 - Composição granulométrica do RMG.

3.2 Índice de consistência

Os resultados do ensaio de índice de consistência são apresentados na Figura 2, bem como as relações água/cimento obtidas para cada argamassa.

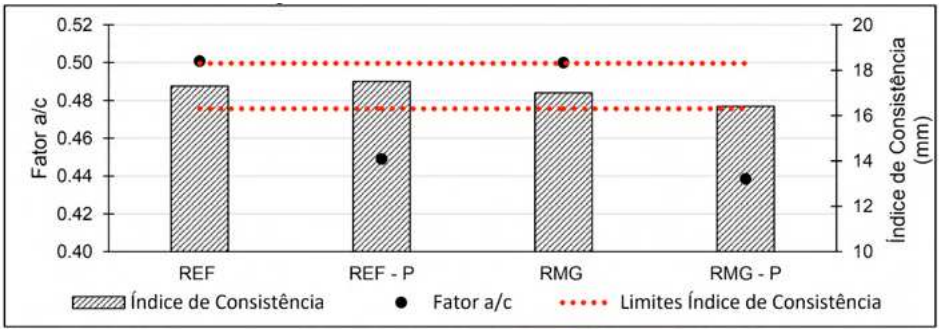


Figura 2 - Resultado do índice de consistência.

Observa-se que a introdução do plastificante permitiu uma redução no fator a/c de 10,20% para a mistura sem resíduo e de 12,20% para a mistura com resíduo. Comparando-se as argamassas REF e RMG, é possível perceber que a introdução do RMG afeta muito pouco a trabalhabilidade, conforme já observado na literatura[2,4,11], apresentando redução do espalhamento de somente 1,73%. Nas amostras contendo aditivo (REF-P e RMG-P), os resíduos mostraram possibilitar a manutenção da trabalhabilidade com baixo fator a/c, com possível tendência de se aumentar a demanda de água, devido à redução do índice de consistência em 6,28%.

3.3 Absorção de água por capilaridade e porosidade

A Figura 3 apresenta os resultados da absorção por capilaridade (Ac) e a variação da absorção de cada amostra em relação à argamassa REF (Δ), calculada pela diferença entre os resultados em cada tempo. Apesar das modificações das composições, a menor absorção por capilaridade final foi obtida para a argamassa de referência. Entretanto, as argamassas com aditivo resultaram em um aumento de absorção final de 22,28% para a amostra REF-P e de 12,15% para a amostra RMG-P, enquanto para a amostra RMG esse aumento foi de 53,16%.

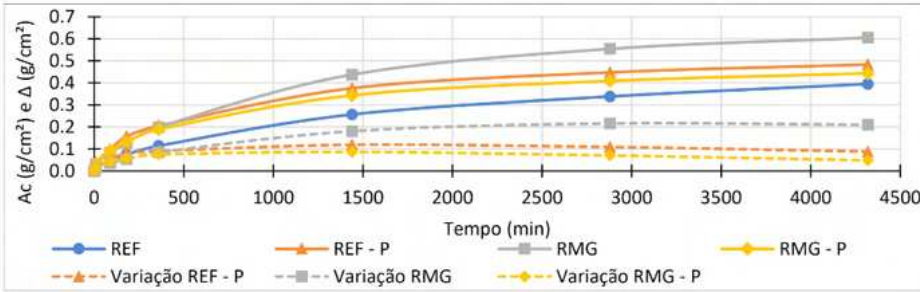


Figura 3 - Resultado da absorção de água por capilaridade (Ac) e taxa de variação (Δ).

Nota-se que, nos minutos iniciais, a variação da absorção das argamassas com plastificante em relação à argamassa REF é superior à da argamassa RMG, indicando que o aditivo propiciou uma mistura mais compacta e um refinamento dos poros, que facilita a absorção de água por capilaridade. Além disso, o uso do aditivo diminui a quantidade de água na mistura, o que reduz, consequentemente, a porosidade. Entretanto, após 360 minutos, há uma inversão de comportamento da variação da absorção, que passa a ser maior para a argamassa RMG, sugerindo um maior número de poros interligados nessa argamassa. Comparando-se as amostras REF-P e RMG-P, observa-se que a substituição do cimento pelo resíduo resultou em uma menor absorção de água, o que se deve ao melhor empacotamento e à menor relação a/c. Portanto, tanto o resíduo como o aditivo plastificante foram responsáveis pela compactação da microestrutura porosa.

Pela análise da porosidade (Figura 4) é possível notar que não houve alterações representativas entre as amostras REF e RMG e as amostras REF-P e RMG-P. Esse resultado indica que, as influências do resíduo e do plastificante estão mais associadas à forma, tamanho, distribuição e conectividade dos poros na microestrutura do que ao volume total destes. Para a relação a/c utilizada, a substituição de 20% do cimento pelo resíduo de mármore e granito não é benéfica em relação à permeabilidade dos compósitos cimentícios, como mostra a Figura 3. Dessa forma, os resultados sugerem que a amostra REF possui menor número de poros capilares comunicantes, mas grande volume de vazios, enquanto a amostra RMG possui estrutura mais refinada, ainda que de porosidade semelhante. Além disso, as amostras REF-P e RMG-P apresentam menor quantidade e dimensão de poros.

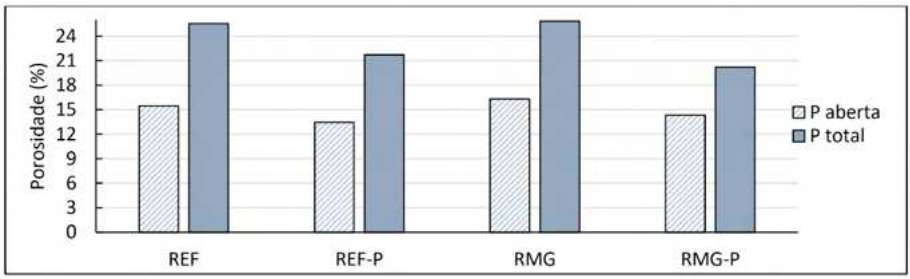


Figura 4 - Resultado da porosidade (P).

3.4 Módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade são apresentados na Figura 5 (a) e os resultados de resistência à compressão na Figura 5 (b).

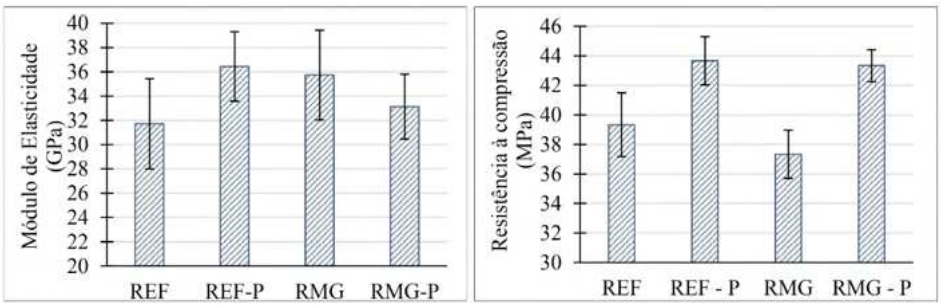


Figura 5 – (a) módulo de elasticidade dinâmico (b) resistência à compressão aos 28 dias.

Considerando-se o valor médio dos resultados do módulo de elasticidade, observa-se um aumento em relação à mistura de referência de 14,88% e 4,44% paras as argamassas REF-P e RMG-P, respectivamente, o que se deve, principalmente, à redução da porosidade. Já a argamassa RMG, embora tenha porosidade próxima à REF, apresentou aumento de 12,64%. Portanto, pode-se inferir que o resíduo levou a uma estrutura porosa mais homogênea, resultando em uma argamassa mais íntegra, com menor propensão às falhas internas.

Na Figura 5 (b) observa-se que as maiores resistências mecânicas foram alcançadas pelas argamassas contendo aditivo, devido à redução do fator a/c. O ganho de resistência, em relação à argamassa REF, foi de 11,19% e 10,18% para REF-P e RMG-P, respectivamente. Apesar de ter menor relação a/c, a argamassa RMG-P não obteve resultado superior à REF-P, provavelmente devido à redução dos componentes responsáveis pela resistência mecânica do compósito, ao substituir o cimento pelo resíduo de mármore e granito (material inerte), conforme apontam estudos[2,11-14]. Comparando-se as argamassas contendo resíduo (RMG e RMG-P), a redução da quantidade de água e a melhor empacotamento de partículas na argamassa RMG-P, resultou em um compósito mais compacto, com melhor estrutura porosa, promovendo ganho de resistência de 16,08%.

4 | CONCLUSÕES

Após as avaliações experimentais, pode-se concluir que a inserção do resíduo e do aditivo plastificante permitiram a manutenção da trabalhabilidade com uma maior redução da quantidade de água e promoveu um refinamento dos poros. Não houve influência representativa no módulo de elasticidade, entretanto, a inserção do resíduo, aparentemente, tornou a estrutura mais homogênea e, na resistência à compressão, a substituição do cimento pelo resíduo não foi benéfica no maior fator a/c.

A utilização do plastificante e do resíduo gerou uma argamassa compacta, permitindo uma compensação da redução do teor de cimento. De forma geral, observa-se que o resíduo é mais eficiente em relações água/cimento mais baixas e sua utilização como filer, promove melhor empacotamento de partículas, contribuindo positivamente para a maioria das propriedades, além de auxiliar a busca por materiais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

1. ABIROCHAS. O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais, julho de 2018. Disponível em: http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Cenario_Mundial_2017.pdf. Acesso em: 25/09/18.

2. Almada, B.S.; Luciane, S.M.; Dutra, J.B.; Bubani, L.C.; Silva, G.J.B.; Santos, W.J.; Aguilar, M.T.P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites, **Construction and Building Materials**, V. 262, 2020.

3. ALIABDO A.A., ELMOATY A.M., AUDA E. M., Re-Use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete. **Construction and Building Materials**, no 50 p. 28–41, 2014.

4. AREL S. H., Recyclability of Waste Marble in Concrete Production**. Journal of Cleaner Production**. v.131, 179-188, 2016.

5. MEDINA G., BOSQUE I. F. S. del, FRÍAS M. ROJAS M. I. S., MEDINA C., Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): scientific and technical considerations, **Journal of Cleaner Production**., v. 148, p. 467-476, 2017.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, Rio de Janeiro, 2005.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **ABNT NBR 9779**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2012.

10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C215: **Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens.** Pennsylvania, p. 7. 2008.

11. BUYUKSAGIS I.S., UYGUNOGLU T., TATAR E., Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar, **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 734-742, 2017.

12. LEI L., PLANK J., Synthesis, working mechanism and effectiveness of a novel cycloaliphatic superplasticizer for concrete. **Cement and Concrete Research**, 2012.

13. SADEK D.M., EL-ATTAR M.M., ALI H.A., Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development, **Journal of Cleaner Production**, v.121, p. 19-32, 2016.

14. VARDHAN K., GOYAL S., SIDDIQUE R., SINGH M., Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement, **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615–621, 2015.

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA NA PAVIMENTAÇÃO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081127

SANTOS, MARIANNY VIANA DOS[1]; SOUZA, WANA MARIA DE[2]; RIBEIRO, ANTONIO JUNIOR ALVES[1]
[1]INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ (IFCE); [2]UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MARIANNYVIANA@GMAIL.COM

RESUMO: A construção de rodovias, pela sua extensão e grande volume de recursos utilizados, constitui uma alternativa de reaproveitamento de diversos resíduos. Assim, este estudo investiga a aplicabilidade do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV) em camadas de pavimentos rodoviários. Para tanto, o resíduo foi triturado e submetido aos ensaios de caracterização física e mecânica, tradicionalmente empregados na pavimentação. Os resultados comprovam o potencial uso do RCV em camadas de sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários. Portanto, a sua utilização apresenta viabilidade técnica e ambiental para a construção de rodovias sustentáveis de acordo com as especificações rodoviárias atuais.

PALAVRAS-CHAVES: Pavimentos rodoviários, resíduo, cerâmica vermelha.

ABSTRACT: The construction of highways, due to their size and the large volume of resources used, constitutes an alternative for the reuse of various wastes. Thus, this study investigates the applicability of the Red Ceramic Waste (RCV) in road pavement layers. For this purpose, the waste was crushed and subjected to physical and mechanical characterization tests, traditionally used in paving. The results prove the potential use of RCV in layers of sub-base and reinforcement of subgrade of road pavements. Therefore, its use presents technical and environmental feasibility for the construction of sustainable highways according to the current road specifications.

KEYWORDS: Road pavements, waste, red ceramic.

1 | INTRODUÇÃO

A produção de cerâmica vermelha consome, exacerbadamente, recursos naturais renováveis e não renováveis, impactando o meio ambiente nas áreas de extração e gerando uma quantidade expressiva de resíduos em seu processo produtivo, os quais não tem destinação definida (DIAS, 2016)(1).

Segundo a Resolução CONAMA n° 307/02(2) os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), dentre estes estão os Resíduos de Cerâmica Vermelha – RCV, são classificados como Classe A, se caracterizam como resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, podendo ser resíduos oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, edificação, entre outros, bem como solos provenientes de

terraplanagem.

O crescimento urbano tem exigido a expansão da malha viária, necessitando-se conhecer materiais com potencial emprego na infraestrutura, principalmente, na pavimentação. A utilização de resíduos oriundos da construção civil em camadas de pavimentos tem-se mostrado uma alternativa viável em termos ambientais e financeiros atualmente. Diversos estudos realizados apresentam resultados satisfatórios no que concerne o seu uso para fins de pavimentação (Fadanelli e Viecheteck, 2010; Lucena, 2012; Cabalar, Hanssan e Abdulnafaa, 2016; Silva e Carvalho 2017)[3][4][5][6]

Diversos estudos analisaram o uso de RCV na pavimentação (Dias 2004; Cavalcante et al., 2006; Silva e Carvalho, 2017; Souza et al., 2019)[7][8][6][9]. Lima (2008)[10] estudou as características físicas e mecânicas de resíduos de construção e demolição visando seu respectivo uso para pavimentos urbanos a serem utilizados em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito de pavimento. Ferreira et al. (2016)[11] analisaram as propriedades físicas e mecânicas do RCV aplicáveis à construção de pavimentos. Souza et al. (2019)[9] analisaram a aplicabilidade do resíduo supracitado na pavimentação , através de misturas com solo, com percentuais de 30, 50 e 70% do resíduo.

Nesta perspectiva, esta pesquisa busca analisar a aplicabilidade do RCV em pavimentos rodoviários, de modo a contribuir com a sustentabilidade na construção de rodovias.

2 | METODOLOGIA

Considerando as propriedades físicas básicas do material, o resíduo foi triturado manualmente com auxílio de um soquete de cravação do conjunto Hilf. Em seguida, foi realizado o peneiramento para a obtenção do material passante na peneira de 19 mm. Por fim, quarteou-se a amostra com o intuito de obter uma quantidade representativa e heterogênea e assim, ser feita a composição granulométrica do material (ABNT NBR 7181/84)[12], e, por conseguinte a caracterização SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Foram realizados, ainda, a determinação dos limites de liquidez (DNER – ME 122/94)[13] e plasticidade do material (DNER – ME 082/94)[14], bem como a densidade real (DNER – ME 093/94) [15].

Em relação a caracterização mecânica, realizou-se a compactação nas energias Proctor Normal, Intermediária e Modificada (DNER-ME 162/94)[16], assim como ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98)[17], o ensaio Treton (DNER-ME 399/99 Agregados)[18] e o California Bearing Ratio -CBR (DNER-ME 049/94)[19].

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o DNIT (2006)[20], a granulometria do agregado é uma das características que garantem estabilidade ao pavimento. Desta forma a granulometria do material pode ser considerada um dos parâmetros que atestam a viabilidade do seu uso para pavimentação. Analisando a curva granulométrica apresentada na Figura 1, pode-se observar que o resíduo triturado se enquadra quase completamente no intervalo da faixa “A” do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Além disso, o material se mostra não uniforme e bem graduada, e com Coeficiente de Uniformidade de 33, portanto, se enquadrando na NBR 15115/04[21] que dispõe sobre os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos, que especifica que o material deve apresentar curva granulométrica, bem graduada, não uniforme, com coeficiente de uniformidade Cu ≥ 10.

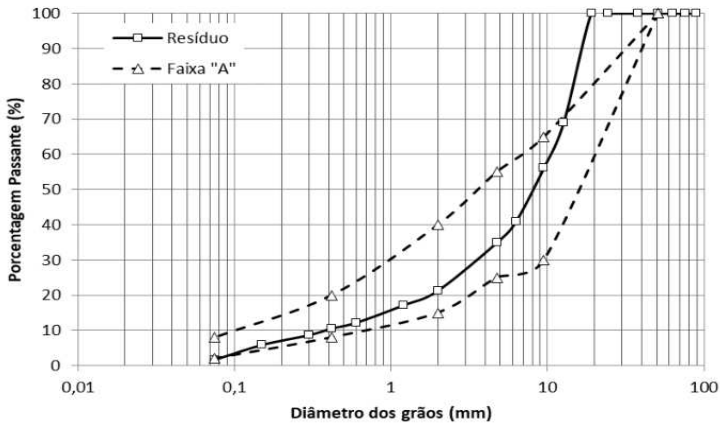


Figura 1- Curva granulométrica do RCV e os limites da faixa A do DNIT (2006)[20].

Fonte: Autores, 2021

No que diz respeito a classificação AASHTO e SUCS, o resíduo foi caracterizado como A-1-a (Pedra Britada pedregulho e areia), ou seja, apresenta um comportamento geral como subleito classificado de excelente a bom, e na SUCS como GW (Pedregulho bem graduado).

Acerca da densidade real do resíduo, este por sua vez, apresentou um valor equivalente a 2,62 g/cm^3. Já em relação aos limites de consistência (liquidez e plasticidade), o resíduo em estudo se classifica como não plástico. Isso se justifica em decorrência da alta absorção do material cerâmico e sua alta porosidade, não havendo coesão entre as partículas, mesmo sendo um material composto de argila.

Quanto a compactação, a massa específica seca máxima do resíduo oscilou de 1,35 g/cm³ a 1,53 g/cm³. Já a umidade ótima do resíduo variou consideravelmente também, estando entre 3,64 % da energia modificada a 9,14% da energia normal, conforme apresentado na Figura 2.

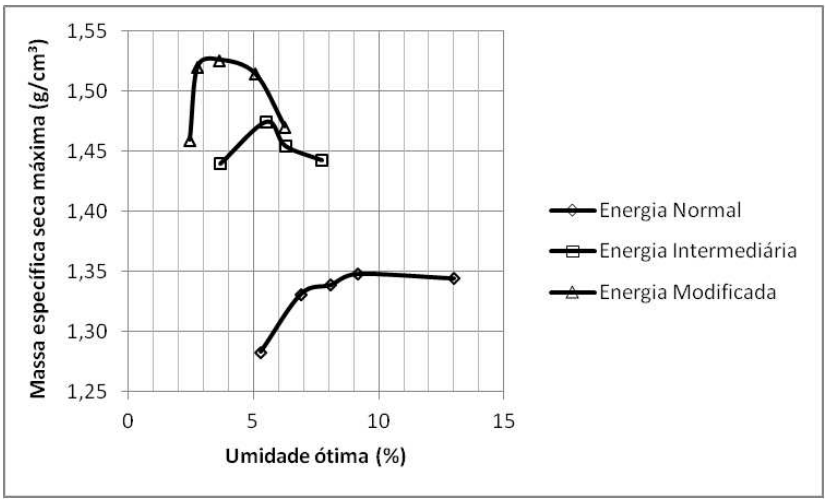


Figura 2- Curva de compactação do resíduo

Fonte: Autores, 2021

Considerando a abrasão, o valor encontrado para o resíduo foi de 44%. Convém ressaltar, que a NBR 15115/04[21], não estabelece faixas de valores específicos para a abrasividade de materiais reciclados. Conforme o DNIT (2006) [20], o resíduo deve apresentar um desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%. Menciona ainda, que pode utilizar materiais com valores superiores, desde que haja experiências no uso do material. Autores como Motta (2005)[22] e Souza et al. (2019)[9] encontraram valores de Abrasão Los Angeles para alguns agregados reciclados de 49,34% e 41% respectivamente. Para Lima (2008)[10], essa variação de resultados é acarretada pela origem do material.

Em relação ao ensaio Treton, este visa mensurar a perda de massa do agregado em decorrência do choque ou impacto inerente ao tráfego. O mesmo conferiu uma perda equivalente a 75,7%, ao passo que a resistência ao choque foi de 24,29%. A NBR 15115/04[21], assim como o DNIT não especificam nenhum valor para resultados obtidos nesta análise. Isso pode ser atribuído à questão do material em estudo ser um material novo. Souza et al. (2019)[9] conferiu uma perda equivalente a 67,72%, ao passo que a resistência ao choque foi de 32,28% para o mesmo resíduo.

De modo a avaliar a capacidade suporte do resíduo, realizou-se o CBR, que de acordo com a NBR 15115/04[21] para uso em reforço de subleito, o CBR deve ser ≥ 12% e expansão ≤ 1,0% referente a energia de compactação normal. Para camadas de sub-base de pavimentos, estes devem ser igual ou superior a 20% e menor ou igual 1,0% respectivamente, executado na energia intermediária, ao passo que para camada de base, o CBR deve ser maior ou igual a 60% e a expansão não pode ser menor do que 0,5%, isso também na energia intermediária.

Já de acordo com o DNIT (2006)[20] para materiais empregados em reforço de subleito, o valor do CBR deverá ser superior ao do subleito, ou seja, ≥ 2% com expansão inferior ou igual a 1%. No que diz respeito à sub-base, as especificações são iguais às

da NBR supracitada. Já em relação ao emprego dos materiais à base de pavimentos, o CBR deverá ser ≥ 80% , com expansão ≤ 0,5% , limite de liquidez ≤ 25% e com índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. A tabela 1 apresenta os valores de CBR de acordo com a energia aplicada.

Energia de Compactação	Valores do CBR (%)
Normal	8
Intermediária	42
Modificada	30

Tabela 1 -Valores obtidos para o CBR

Conforme os resultados obtidos nos ensaios, todas as amostras estudadas conferiram resultados iguais a 0% no que concerne à expansão. Quanto aos valores de CBR para o resíduo, o mesmo pode ser empregado em reforço de subleito e em sub-base de pavimentos o mesmo deve ser compactado no mínimo na energia intermediária.

4 | CONCLUSÃO

Pela classificação AASHTO, o RCV tem aspecto granular e comportamento de excelente a bom quando utilizado em camadas de pavimentos. O RCV também se enquadra nas faixas utilizáveis segundo o DNIT (2006) [20]. O material apresentou capacidade suporte aplicável em reforço de subleito e sub-base de pavimentos, a depender da energia de compactação.

Desta forma, o material analisado apresentou boas condições técnicas preliminares para seu emprego em camadas de pavimentação, sendo assim tecnicamente viável e capaz de contribuir consideravelmente para reduzir os impactos causados pelas obras de pavimentação e também de geração do RCV.

REFERÊNCIAS

1. DIAS, D.K.R. (2016) . **Reutilização do resíduo cerâmico oriundo do pólo oleiro de Iranduba e Manacapuru para emprego como elemento constituinte de base e sub-base de pavimento.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

2. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos da construção civil**. CONAMA.** Artigo 3º Incisos de I a IV da resolução nº 307 de 05/07/2002.

3. FADANELLI, L. E. A. WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização do lodo de ETA em solo: O cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 22-30, 2010.

4. LUCENA, L.C.F. , L. **Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e sub-base de pavimentos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

5. CABALAR, A. F.; HASSAN, D. I.; ABDULNAFAA, M. D. Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-16, jun. 2016.

6. SILVA, J. P. S.; CARVALHO, S. B. Uso de resíduos de cerâmica vermelha para o melhoramento de camadas de pavimentos de baixo tráfego em Palmas-TO. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 5, n. 1, p. 41-52, 2017.

7. DIAS, J,F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para o seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2004.

8. CAVALCANTE, R, H. et al. (2006) **Estudos para aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha de Sergipe na pavimentação rodoviária**. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Goiânia.

9. DE SOUZA, W. M. et al. Resíduos De Cerâmica Vermelha Como Um Material Ambientalmente Sustentável Para Uso Na Pavimentação. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 202 - 213, dez. 2019.

10. LIMA, J. H. C. **Utilização de Resíduo de Construção e Demolição para Pavimentos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2008.

11. FERREIRA, J. W. S. (2016) Análise Das Propriedades e Viabilidade Econômica Da Cerâmica Vermelha Utilizada Como Agregado Reciclado Miúdo Para Pavimentação. **Colloquium Exactarum**, v. 8, n.3. p.01 –12.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/84**: Solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

13. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 122/94: Solos – determinação do limite de liquidez. Norma rodoviária. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

14. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 082/94: Solos – Determinação do limite de plasticidade.Norma rodoviária. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

15. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94.** Solos – determinação da densidade real, Rio de Janeiro, 1994.

16. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 162/94.** Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, Rio de Janeiro,1994.

17. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98.** Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro - RJ, 1998.

18. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 399/99**: Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton. Rio de Janeiro – RJ. 1999.

19. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 049/94:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

20. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação**. 3.ed. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.– Rio de Janeiro. 274p. 2006.

21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115/2004**: Agregados reciclados de resíduos sólidos na construção civil- Execução de camadas de pavimentação- Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

22. MOTTA, R. S. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo da construção civil para aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.



RESÍDUO DE CONCRETO COMO SUBSTITUTO AO CIMENTO: AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DAS EMISSÕES

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081128

OLIVEIRA; DAYANA RUTH BOLA[1]; LEITE; GABRIELA[2]; POSSAN; EDNA[3]; MARQUES FILHO; JOSÉ[4];
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ; [2]UNIVESIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA; [3]UNIVESIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA; [4]UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: EPOSSAN@GMAIL.COM

RESUMO: Avaliou-se a resistência à compressão e as emissões de CO_2 de matrizes de Cimento Portland (CP) com substituição de resíduo de concreto (RC) de 0%, 7%, 15% e 25%, em função do tempo de processamento do resíduo (0, 0,5., 2 e 6 h). Os resultados indicam que a resistência à compressão na matriz com 15% e 25% de resíduo tratado, atende às exigências para a classe C40 e C32 da norma técnica brasileira de CP, com potencial de mitigar as emissões por tonelada de cimento em até 25%. Com o emprego do resíduo foi possível reduzir 13% do consumo de cimento/MPa aos 91 dias.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduo de concreto. Tratamento de partículas. Emissões de CO_2.

ABSTRACT: Compressive strength and CO_2 emissions of Portland cement (CP) cement matrices were evaluated, with replacement of 0%, 7%, 15% and 25% of concrete waste as a function of waste processing time (0, 0.5, 2 and 6 h). The results indicate that the compressive strength in the matrix with 15% and 25% of treated waste, meets the requirements for class C40 and C32 of the Brazilian technical standard for PC, with the potential to mitigate emissions per ton of cement by up to 25%. With the use of concrete waste, it was possible to reduce 13% of cement consumption/MPa at 91 days.

KEYWORDS: Concrete waste. Particle treatment. CO_2 emissions.

1 | INTRODUÇÃO

Tendo em vista que as emissões de CO_2 oriundas da indústria cimenteira corresponde cerca de 5 a 7% das emissões antropogênicas (Bordy et al., 2017[5]; Scrivener et al., 2018[9]; SNIC, 2019[10]), provenientes sobretudo da descarbonatação das rochas carbonáticas no processo de clinquerização, e que esta etapa é responsável por 70% das emissões totais da fabricação do cimento (SNIC, 2019[10]), ações globais como o Acordo de Paris (2015) e Agenda 2030 (2016-2030), voltadas à redução dos impactos ambientais antropodinâmicos, associadas principalmente à produção de clínquer de cimento Portland são de grande importância. Perfaz a perspectiva de que crescimento da demanda de cimento Portland até 2050 atinja o patamar de 6 bilhões de toneladas (Scrivener et al., 2018[9]), resultantes da necessidade em edificar e manter o ambiente construído, do elevado déficit habitacional e de infraestrutura e da expectativa de crescimento populacional.

Neste contexto, o do resíduo de concreto (RC) em substituição ao cimento Portland, pode ser uma alternativa para redução das emissões associadas ao cimento e à problemática da disposição de resíduos. Além de ser uma estratégia para a produção de matrizes com baixo consumo de clínquer (kg/m³/MPa) e de resistências que atendam aos parâmetros normativos. Para tanto, neste estudo são apresentados os resultados da resistência à compressão e de emissões do cimento Portland, produzido com diferentes teores e tempos de processamento do resíduo de concreto para emprego como substituto ao cimento.

2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de determinar a influência do resíduo de concreto, quando empregado em substituição ao cimento Portland, fez-se a avaliação da resistência à compressão do cimento empregando-se os procedimentos da NBR 7215[(2)], conforme proporções apresentadas na Tabela 1. Para o traço fixo 1:3:0,48, foram realizadas substituições em volume de cimento Portland por Resíduo tratado de 0, 7, 15 e 25%. A determinação da resistência à compressão foi conduzida aos 28 e 91 dias, tomando-se a média de 4 amostras cilíndricas (50mm x 100mm) para cada idade, curadas em água saturada de cal.

Utilizou-se cimento CP V ARI com massa específica de 3,09 g/cm³ e finura Blaine 4.459 cm²/g. Como agregado miúdo, foi empregado areia normal com distribuição granulométrica #16 (1,18mm), #30 (0,60mm), #50 (0,30mm) #100 (0,150mm) conforme NBR 7215[(2)].

O resíduo avaliado foi obtido pelo processamento de corpos de prova de concretos descartados submetido a diferentes tipos de tratamento físico e mecânico (devido a questões de sigilo, o processo de tratamento não é apresentado neste artigo).

Resíduo (RCF)		Consumo material (kg/m³)		Emissões CO_2		Fc (91 dias)	Índice de ligante (Kg.C/MPa)
Teor (%)	Moagem (h)	Cimento Portland (C)	RCF	Cimento de RCF (kg/t)	Argamassa (Kg/m³)		
0	Ref	512,2	0,0	866,0	443,6	50,4	10,2
7	0h	476,4	35,9	805,7	412,7	31,0	15,4
	0,5h	476,4	35,9	806,4	413,0	41,7	11,4
	2h	476,4	35,9	808,6	414,2	42,4	11,3
	6h	476,4	35,9	814,6	417,3	48,9	9,8
15	0h	435,4	76,8	736,7	377,4	33,4	13,0
	0,5h	435,4	76,8	738,3	378,1	43,6	10,0
	2h	435,4	76,8	743,1	380,6	46,9	9,3
	6h	435,4	76,8	755,9	387,2	38,5	11,3

25	0h	384,2	128,1	650,5	333,2	32,0	12,0
	0,5h	384,2	128,1	653,1	334,5	30,7	12,5
	2h	384,2	128,1	661,2	338,7	33,8	11,4
	6h	384,2	128,1	682,6	349,6	29,9	12,9

Tabela 1 – Consumo de materiais para produção de 1m³ de argamassas, emissões do cimento e dos compósitos de RCF e índice de ligante (kg de cimento para produção de 1 MPa)

Fonte: Os autores (2021)

A massa específica dos materiais foi determinada de acordo com a NBR 16605[3] pelo método de *Le chatelier*. A finura Blaine foi realizada em equipamento Polyperm 200 – ACP Instruments. A granulometria à laser foi conduzida em granulômetro (Cilas 1190). O ensaio de BET em equipamento Quantachrome Nova 3200e. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi conduzida em equipamento Zeiss – EVO MA10. A atividade pozolânica foi realizada com base à NBR 5752[1]. A difração de raios X (DRX) em difratrômetro Panalytical e banco de dados Crystallography Open Database. A análise química por fluorescência de raios-x (FRX) em espectrômetro Panalytical Axios Max.

Para a análise das emissões foi considerada a média dos limites máximos e mínimos da NBR 16697[4] e 3,5% de teor de sulfato de cálcio presente na composição do cimento. Adotou-se que a produção de cada tonelada de clínquer emite 866kg.CO_2/t (WBCSD, 2016)[11]. Para o beneficiamento do resíduo as emissões calculadas forma na ordem de 333kg.CO_2/t a 444kg.CO_2/t, dependendo do tipo de tratamento empregado). Não foram consideradas as emissões de transporte. O índice de ligante (kg.C/MPa) indica quantos kg de cimento foram empregados para a obtenção de 1 MPa, correspondendo à relação entre o consumo de cimento Portland empregado na mistura e a resistência à compressão obtida na idade de 91 dias.

3 | DISCUSSÕES DE RESULTADOS

3.1 Caracterização dos materiais

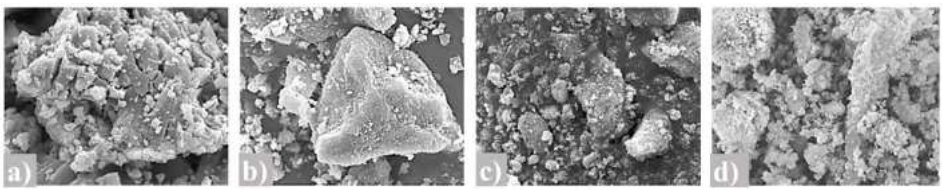
O resíduo obtido como parâmetro inicial (0h) apresentou índice de atividade pozolânica de 66,18%, abaixo do limite mínimo recomendado pela NBR 5752[1] de 90%.

Na Figura 1 tem-se a relação entre o diâmetro médio e a finura Blaine do resíduo de concreto em função do tratamento empregado. Observa-se que nas primeiras horas de processamento, tem-se aumento considerável da área superficial das partículas. A partir de 6 horas de cominuição, observa-se baixa eficiência no processo considerando a energia e o tempo necessários para elevação da área superficial. Assim, neste estudo foram empregados resíduos cominuídos por 0,5, 2 e 6 horas, sendo observado nas micrografias (figura 2) aglomerados de partículas do resíduo de aspecto poroso e esponjoso referente à superfície hidratada e aos poros capilares finos do resíduo.



Figura 1 –Diâmetro médio e finura Blaine do RCF em função do tempo de moagem

Fonte: Os autores (2021)



Imagens MEV do RCF a) RCF0h magnificação:10.000x b) RCF0.5h magnificação: 10.000x c) RCF2h magnificação: 10.000x d) RCF6h magnificação: 10.000x

Figura 2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura

Fonte: Os autores (2021)

Verifica-se na Tabela 2 que quanto maior o tempo de tratamento, maior a massa específica dos resíduos e menores os diâmetros médios obtidos pelo ensaio de granulometria à laser. Em relação ao resíduo 0h, o d50 são inferiores em: 56% 0.5h, 75% 2h e 83% 6h, respectivamente.

Materiais	CP V- ARI	0h (#100)	0.5 h	2 h	6 h
ρ (g/cm³)	3,14	2,57	2,61	2,71	2,73
Blaine (cm²/g)	4215,70	1732,30	4350,70	6583,00	7160,00
Diâmetro médio (µm)	14,53	54,85	24,31	13,51	9,27
BET (cm²/g)	65.750	96.690	99.510	74.370	51.370

Tabela 2 – Resultados da caracterização física dos materiais

Fonte: Os autores (2021)

Nos difratogramas (Figura 3) é possível observar que as principais fases em comum encontradas nos materiais correspondem à Alita e Calcita. No resíduo tem-se predominância de quartzo, que advém do agregado miúdo natural empregado na produção do concreto que deu origem ao resíduo, corroborando com as análises de FRX (Tabela 3) que indicaram elevados teores de sílica (SiO2 > 40%), e baixos teores de CaO (três vezes inferior ao cimento).

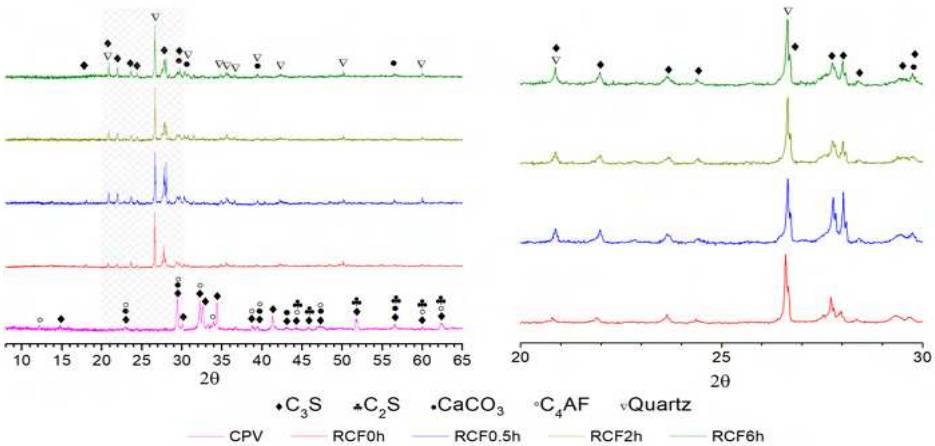


Figura 3 – Análise de DRX dos materiais

Fonte: Os autores (2021)

Material	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	Na_2O	TiO_2	K_2O	SO_3	Perda ao Fogo
CPV	19,7	60,9	3,1	4,6	2,5	0,2	0,2	0,8	3,9	3,6
RCF0.5h	43,1	18,5	11,8	10,0	2,5	1,3	1,8	1,1	0,8	8,3
RCF2h	43,1	18,5	11,6	9,7	2,7	1,2	1,7	1,1	0,9	8,8
RCF6h	44,2	17,5	11,7	9,6	2,7	1,3	1,7	1,1	0,8	8,7

Tabela 3 – Fluorescência de raios-x dos materiais

Fonte: Os autores (2021)

3.2 Desempenho mecânico das argamassas

Nota-se o aumento gradativo da resistência à compressão conforme o avanço das idades de hidratação (Figura 4). Foi constatado que a adição de 7% e 15% de resíduo, independente do processo de tratamento, conduziram a resistências mecânicas que atendem ao parâmetro normativo do cimento Portland classe 32 MPa, aos 28 dias. Todas as matrizes com teores de 7% de resíduo e 15% de RC 2h atingiram o patamar C40 aos 28 dias e aos 91 dias as matrizes contendo 15% de RC 0.5h. Denota-se que a longo prazo, as argamassas com resíduo tendem a apresentar incrementos de resistência, compensando o processo de dissolução comentado por John et al.(2018)[7].

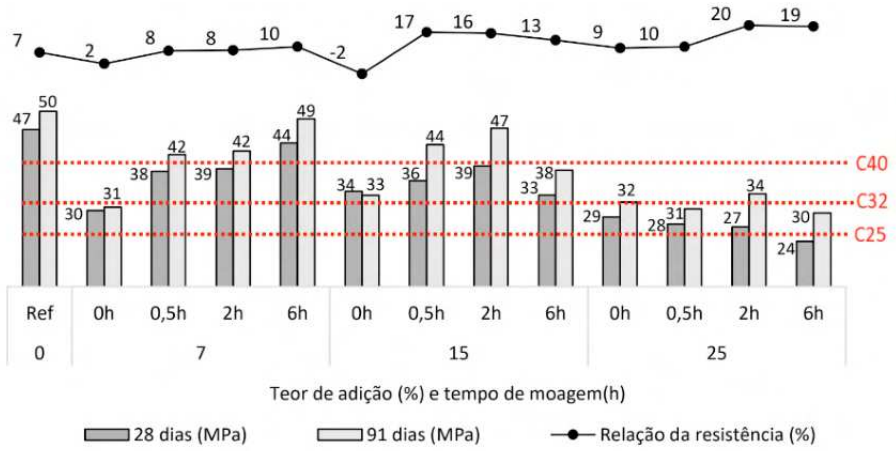


Figura 4 – Efeito do tempo de moagem e teores de substituição na resistência à compressão e emissões de CO_2

Fonte: Os autores (2021)

3.3 Emissões e índice de ligante

Todas os cimentos produzidos (tabela 1 e figura 5) são menos emissivos que o de referência (CP V ARI), chegando-se a patamares de redução da ordem de 25% de kg.CO_2/t de cimento de RC produzido (25% de resíduo a 0h). Quanto maior o teor de substituição de cimento Portland por resíduo tratado menor as emissões de CO_2 associadas por tonelada de produto. Já o aumento do tempo de tratamento do resíduo eleva as emissões de CO_2 por tonelada de cimento, porém essa elevação não suplanta as emissões advindas do clínquer.

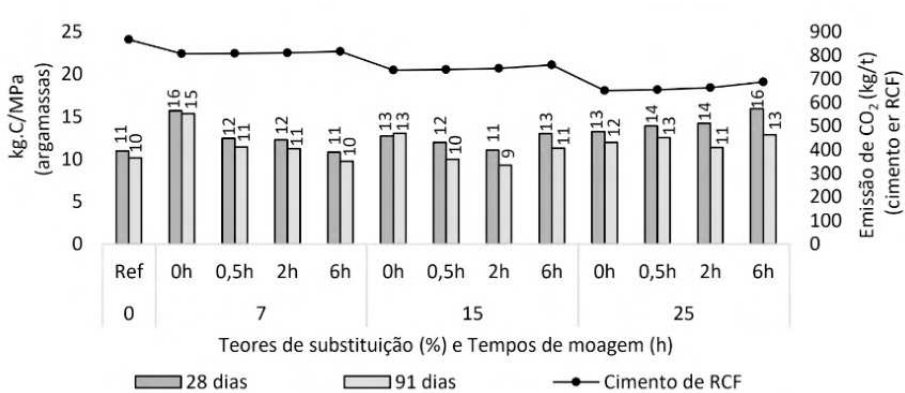


Figura 5 – Índice de ligante (kg.C/MPa) e emissões de CO_2 do cimento de RCF (kg/t)

Fonte: Os autores (2021)

Em relação ao índice de ligante, constata-se na tabela 1 e figura 5 que as argamassas produzidas com 15% de resíduo em substituição ao cimento Portland apresentaram melhor desempenho, para os tempos de tratamento de 0,5 e 2 horas com 10 e 9,3 kg.C/MPa, respectivamente. Para 25% de substituição, foram obtidos resultados similares ao de referência apenas aos 91 dias para o resíduo tratado por 2 horas (11,4 kg.C/MPa). Sugere-se que novos estudos sejam conduzidos considerando o emprego de aditivo superplastificante, a absorção de água do resíduo e outros processos de tratamento de partículas. É importante que a matriz a base de cimento com o resíduo de concreto seja avaliada quanto aos aspectos de durabilidade.

4 | CONCLUSÕES

Foram produzidos cimentos com resíduo de concreto com até 25 % de substituição ao cimento Portland, sendo quanto maior o tempo de tratamento, maior a resistência à compressão obtida, para os três teores de substituição avaliados. Com 25% de substituição foi possível produzir cimentos que atendem a classe de resistência C32. Com os teores de 7% e 15%, atingiu-se a classe C40. O incremento mais expressivo de resistência à compressão ao longo do tempo se deu aos 91 dias. Foi demonstrado que as matrizes com resíduo apresentam potencial de mitigar as emissões por kg.CO_2/t em até 25%, além de reduzir o consumo de ligante/MPa em até 13%. Dado o volume de concreto produzido anualmente em todo o mundo e ao volume de resíduo de construção e demolição gerado, essa incorporação é promissora para elaboração de cimentos menos emissivos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação científica à Gabriela Leite. À Unila pelo fomento à pesquisa. Ao Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) e ao Laboratório Interdisciplinar em Ciências Físicas (LICF) pelo apoio à pesquisa experimental.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5752:** Materiais pozolânicos -Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215:** Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

5. BORDY, A.; YOUNSI, A.; AGGOUN, S.; FIORIO, B. Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 1–8, 2017. Elsevier Ltd.

6. CZIGLER, T et al. Laying the foundation for zero-carbon cement: The cement industry is a top source of CO2 emissions, but abatement pressures could prompt efforts to reimagine the business. **Mckinsey e Company**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 2, p. 9, 2020.

7. JOHN, V. M.; DAMINELI, B. L.; QUATTRONE, M.; PILEGGI, R. G. Fillers in cementitious materials - Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, 1. dez. 2018. Elsevier Ltd.

8. PAZ, C. F. **Inventário do ciclo de vida aplicado à produção de agregados a partir de resíduos de construção e demolição.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

9. SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018. Elsevier Ltd.

10. SNIC; ABCP**. Roadmap tecnológico do cimento**. Rio de Janeiro, 2019.

11. WBCSD, W. B. C. FOR S. D**. Getting the numbers right project - Reporting CO_2** (GNR Project). Disponível em: <https://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/>.

USO DO RESÍDUO DA NEFELINA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081129

ROSA; LAURA PEREIRA[1]; HALTIERY; DIEGO SANTOS[2]; PEREIRA; FABIANO RAUPP[3]; ANDRADE; LUCIMARA APARECIDA SCHAMBECK [1]
[1]UNISUL-TUBARÃO; [2]IFSC-CRICIÚMA; [3]UNESC/PPGCEM.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ROSALP.LAURA@GMAIL.COM

RESUMO: É de senso comum que as atividades mineradoras, bem como a construção civil, necessitam de ações mais sustentáveis. Isso inclui novas estratégias para uso de seus resíduos sólidos. Desta forma, este trabalho utilizou o resíduo da nefelina como agregado em substituição ao natural (35%, 70% e 100%) em argamassas de assentamento. Os agregados foram analisados em relação aos principais parâmetros físicos normativos brasileiros e quimicamente por ensaio de FRX. As argamassas foram analisadas quanto à consistência, densidades, resistência à tração na flexão e à compressão. Os resultados indicaram uma viabilidade técnica para o uso do resíduo da nefelina, em substituição a areia natural.

PALAVRAS-CHAVES: Nefelina, resíduos, argamassas, sustentabilidade.

ABSTRACT: It is common sense that mining activities, as well as civil construction, need more sustainable actions. This includes new strategies for using your solid wastes. Thus, this work used nepheline waste as an aggregate to replace the natural (35%, 70% and 100%) in settlement mortars. The aggregates were analyzed in relation to the main Brazilian normative physical parameters and chemically by FRX test. The mortars were analyzed for consistency, densities, tensile strength in bending and compression. The results indicated a technical feasibility for using nepheline waste to replace natural sand.

KEYWORDS: Nepheline, wastes, mortars, sustainability.

1 | INTRODUÇÃO

A construção civil é considerada um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país, uma vez que proporciona milhares de empregos diretos e indiretos, movimenta o comércio com a compra e venda de materiais de construção e contribui para a elevação do PIB[(1)]. Entretanto, sabe-se que suas atividades são responsáveis por sérios impactos ao meio ambiente, devido a elevada extração de matérias-primas não renováveis, necessárias à produção de concretos e argamassas[(2)].

Em 2014, a produção de agregados para a construção, em todo o mundo foi de, aproximadamente, 45 bilhões de toneladas[(3)]. Já no Brasil, cerca de 530 milhões de toneladas de areia e brita foram produzidos em 2019, sendo atribuído ao agregado miúdo cerca de 220 milhões de toneladas[(4)]. A elevada produção de agregados naturais

para a construção preocupa, principalmente, pelos inúmeros impactos ambientais ocasionados pelas suas extrações e, também, pela escassez de reservas destes recursos não renováveis.

Atrelado a isto, os processos extrativistas das indústrias mineradoras geram uma expressiva quantidade de resíduos, provenientes da extração de maciços rochosos[5] utilizados como matérias-primas para a fabricação de diversos produtos. Estes produtos, muitas vezes, também são destinados à construção civil, como a exploração da nefelina sienito, utilizada como fundente na produção de vidros e cerâmicas[6]. Apesar das fundamentais aplicações destas matérias-primas, os resíduos da nefelina, após o beneficiamento, são dispostos em pilhas ou em barragens de contenção, podendo acarretar em graves desastres sociais e ambientais[7].

No processamento de rochas ornamentais, aproximadamente, 40% do volume do bloco processado é considerado resíduo, sendo em torno de 1,5 milhões de toneladas correspondente a resíduos finos e 1,0 milhão de toneladas a resíduos grossos, quantidades estas, geradas anualmente no país[5]. O contexto é semelhante para a nefelina sienito, visto que, durante sua extração e beneficiamento, são dispostas numerosas quantidades de resíduos arenosos representando cerca de 25% da rocha beneficiada, sendo retirados do processo[8].

Com intuito de minimizar estes impactos ambientais, deve-se incentivar o uso de materiais alternativos que possam substituir os naturais, para que se atenda a necessidade de insumos para a construção civil, ao mesmo tempo que contribua para a redução dos resíduos oriundos da extração destas rochas[9,10].

Neste contexto, este trabalho objetivou a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento da nefelina sienito, como substituição ao agregado miúdo para a produção de argamassas de assentamento. Espera-se, que o resíduo seja uma alternativa oportuna e promissora para a redução do consumo de matérias-primas não renováveis e, principalmente, para o aproveitamento do resíduo do beneficiamento da rocha, promovendo, assim, um desenvolvimento mais sustentável da construção civil e da mineração de nefelina.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais utilizados

Para a realização do programa experimental, utilizou-se como agregados o resíduo proveniente do beneficiamento da nefelina sienito, denominado Anef e areia natural lavada de leito de rio, designada Anat. O resíduo foi coletado em uma mineradora no sul de Santa Catarina e a areia natural foi proveniente de depósito de materiais de construção na cidade de Içara, Santa Catarina. Como aglomerantes para a produção das argamassas, utilizou-se um cimento Portland CP II F-32 e uma cal hidratada (CH-I), obtidos em materiais de construção.

2.2 Metodologia

A coleta do resíduo foi realizada em pontos distintos das pilhas de disposição, transportado ao laboratório, seco em estufa por 24h, em temperatura de

aproximadamente 100ºC, armazenado em bombonas plásticas devidamente fechadas e identificadas, e acondicionadas em condições laboratoriais. Da mesma forma, o agregado natural, após a coleta, também foi seco em estufa por 24h, armazenado em bombonas plásticas e acondicionado no laboratório. Na Tabela 1 estão apresentados, resumidamente, os ensaios realizados para a caracterização dos agregados, com suas respectivas normas regulamentadoras, bem como o objetivo do emprego de cada ensaio. Realizaram-se três determinações para cada ensaio citado a seguir, com exceção da fluorescência de raios X, onde realizou-se apenas uma determinação.

Propriedade	Referência	Objetivo
Distribuição granulométrica	(11)	Determinar a curva granulométrica e o módulo de finura
Teor de material pulverulento	(12)	Determinar a quantidade de partículas menores que 75 µm
Massa específica	(13)	Determinar a densidade real dos agregados
Massa unitária	(14)	Determinar a densidade aparente dos agregados
Absorção de água	(15)	Determinar a penetração de água nos poros permeáveis
Interação entre as partículas	(16)	Associar as propriedades da massa específica e unitária
Fluorescência de raios X	-	Identificar os elementos químicos dos agregados

Tabela 1 – Ensaios de caracterização do agregado natural e do resíduo da nefelina

Para a produção das argamassas de assentamento, utilizou-se o traço em volume de 1:2:9 (cimento:cal:areia), onde os materiais foram dosados em massa, e determinou-se quatro diferentes teores de substituição do agregado natural (Anat) pelo resíduo (Anef). A Tabela 2, a seguir, expõe as nomenclaturas adotadas para cada argamassa realizada, assim como, os teores de Anat e Anef em cada dosagem. Com a finalidade de comparar igualmente a demanda de água entre os traços, fixou-se a quantidade de água de amassamento, necessária para uma consistência de, aproximadamente, 260mm para a argamassa de referência (T0), e adotou-se a mesma relação água/aglomerante (a/a), de 1,20, para as demais.

Nomenclatura	Descrição	Composição
T0	Traço com 0% de resíduo	cimento: cal: 100% Anat: 0% Anef: água
T35	Traço com 35% de resíduo	cimento: cal: 65% Anat: 35% Anef: água
T70	Traço com 70% de resíduo	cimento: cal: 30% Anat: 70% Anef: água
T100	Traço com 100% de resíduo	cimento: cal: 0% Anat: 100% Anef: água

Tabela 2 – Dosagens realizadas e nomenclaturas adotadas

As argamassas foram produzidas com o auxílio de uma argamassadeira, onde seguiu a sequência de mistura: água, aglomerantes e metade dos agregados, sendo misturados por 30s em velocidade baixa. Na sequência, adicionou-se o restante dos agregados, misturando por mais 30s em velocidade baixa. Após, as paredes e a pá do recipiente foram rasadas por 15s, e por fim, misturou-se novamente os materiais por

mais 60s em velocidade alta.

Após a mistura dos insumos, realizou-se os ensaios de índice de consistência[17] e densidade de massa[18], no estado fresco das argamassas. Para os ensaios no estado endurecido, moldou-se corpos de prova prismáticos (4cmx4cmx16cm) logo após a mistura dos constituintes, sendo essa moldagem realizada em duas camadas iguais e cada camada adensada com 30 quedas na mesa de adensamento[19]. Os corpos de prova foram mantidos em condições laboratoriais por 48h, e após esse tempo foram desmoldados e submersos em água até os 28 dias, quando foram submetidos aos ensaios de densidade endurecida[20], resistência à tração na flexão e à compressão[19]. Realizaram-se três determinações para cada ensaio citado anteriormente.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos agregados

A partir das massas retidas acumuladas nas peneiras do ensaio de composição granulométrica, traçou-se as curvas da distribuição granulométrica para o resíduo (Anef) e para o agregado natural (Anat), apresentadas na Figura 1.

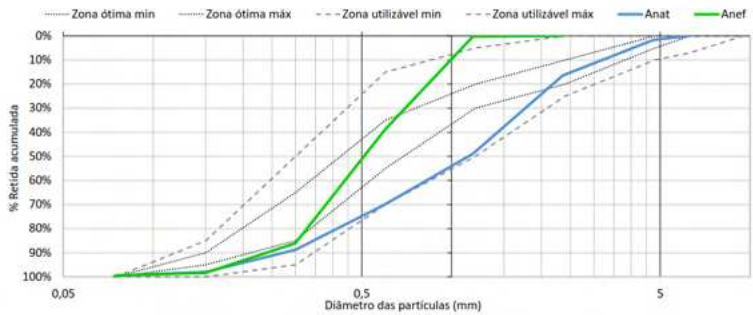


Figura 1 – Curva de distribuição granulométrica dos agregados

Fonte: Autores

Nas curvas granulométricas, percebe-se que os agregados se enquadraram completamente nas zonas utilizáveis, exceto uma fração do Anef, de aproximadamente 5% em massa, na peneira com abertura de malha de 1,18 mm, devido à carência dessa fração no resíduo. Observa-se, ainda, que as curvas do Anat e do Anef se apresentam de forma contínua e bem graduada, estando o Anef à esquerda do Anat, portanto, granulometricamente mais fino.

Na Tabela 3 estão expostos os resultados das determinações realizadas com os agregados Anat e Anef, sendo elas, a dimensão máxima característica (DMC), o módulo de finura (MF), o teor de material pulverulento (TMP), a massa específica (ME), a massa unitária (MU), a absorção de água (ABS), o índice de vazios (e), a porosidade (η) e o empacotamento (ξ).

Agregado	DMC (mm)	MF	TMP (%)	ME (g/cm³)	MU (g/cm³)	ABS (%)	e	η	ξ
Anat	2,36	3,24	3,39	2,52	1,52	0,62	0,66	39,68	60,32
Anef	1,18	2,23	2,75	2,49	1,34	0,70	0,86	46,18	53,82

Tabela 3 – Propriedades determinadas para os agregados

Os valores da DMC e do MF do Anef, 1,18mm e 2,23 respectivamente, indicam que o resíduo pode ser classificado como uma areia fina, enquanto os valores para o Anat, 2,36mm e 3,24 respectivamente, o classificam como uma areia grossa. Para o TMP, verifica-se uma menor quantidade de partículas menores que 75 µm para o Anef, de 2,75%, em relação ao Anat, com um teor de 3,39%. Geralmente, agregados provenientes de britagem, como o Anef, apresentam um elevado teor de partículas pulverulentas, em comparação aos agregados naturais[21]. Entretanto, está menor concentração de finos pode ser explicada devido a presença de aero classificadores no processo de beneficiamento da nefelina sienito, capazes de reterem com grande eficiência as partículas sólidas maiores que 1 µm. Desta forma, durante o processo de desferretização da nefelina sienito, essa fração é parcialmente recolhida pelos filtros, reduzindo, assim, a concentração no Anef.

A massa específica real dos agregados, Anat e Anef, apresentaram valores semelhantes de 2,52g/cm³ e 2,49g/cm³, respectivamente. Quanto aos resultados das massas unitárias, o Anef (1,34g/cm³) apresentou uma massa inferior ao Anat (1,52g/cm³). Em relação a absorção de água, o Anef apresentou um valor ligeiramente superior (0,70%) quando comparado com o Anat (0,62%). Os valores apresentados para massa específica, massa unitária e absorção conferem com os encontrados para as rochas comumente utilizadas na construção civil[22].

Analisando os índices físicos obtidos por relações entre as massas unitárias e específicas, observa-se que o Anef possui maior índice de vazios e porosidade e menor empacotamento, quando comparado ao Anat. Estes resultados podem refletir em uma pior mobilidade do sistema, interferindo em propriedades, como perda de fluidez e trabalhabilidade. Além disso, podem interferir em propriedades no estado endurecido das argamassas, como falta de coesão, maior porosidade, além de queda da resistência mecânica[21].

Os principais óxidos que compõem os agregados Anat e Anef, obtidos através do método de Fluorescência de Raios X (FRX), se encontram na Tabela 4, a seguir.

Agregado	Teor dos elementos (%)											
	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	MnO	ZrO_2	ZnO	NbO	Rb_2O	CuO
Anat*	91,90	3,56	0,97	1,01	0,11	1,16	-	-	-	-	-	-
Anef	58,78	16,84	7,77	10,85	1,90	0,83	1,15	0,53	0,09	0,08	0,06	0,03

*Modificado de (23)

Tabela 4 – Fluorescência de raios X dos agregados

Observa-se que, o resíduo é composto majoritariamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de potássio (K_2O), sendo estes quatros óxidos responsáveis por cerca de 95% da sua composição. Já o agregado natural, é composto quase que, exclusivamente, por sílica com cerca de 92% da composição. As principais diferenças entre os agregados estão no teor de sílica (≈33%), na alumina (≈13%), no óxido de ferro (≈10%) e no óxido de potássio (≈7%).

3.2 Caracterização das argamassas

Os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas, nos estados fresco e endurecido, estão apresentados na Tabela 5, sendo eles, o índice de consistência (consistência), a densidade no estado fresco (ρ_f), a resistência à tração na flexão (RT), a resistência à compressão (RC) e a densidade no estado endurecido (ρ_e). Cada ensaio foi realizado com três amostras, sendo o desvio padrão (σ) apresentado, entre parênteses, ao lado do valor médio das determinações.

Traço	Consistência (mm)	ρ_f (kg/m³)	RT (MPa)	RC (MPa)	ρ_e (kg/m³)
T0	264 (5)	2066 (0,20)	1,05 (0,11)	1,91 (0,02)	1925 (7,69)
T35	243 (6)	2030 (0,30)	1,26 (0,01)	2,16 (0,07)	1842 (2,28)
T70	196 (2)	1962 (0,10)	1,34 (0,07)	2,75 (0,04)	1802 (0,62)
T100	168 (2)	1867 (0,10)	1,04 (0,11)	1,98 (0,02)	1641 (7,81)

Tabela 5 – Resultados de caracterização das argamassas

O índice de consistência médio de 264mm, para a argamassa referência (T0), foi alcançado com a relação água/aglomerante (a/a) de 1,20. Com base neste resultado, fixou-se esta relação para os demais traços, com o intuito de permitir uma análise análoga das consistências. Observa-se, com base nos resultados, que a incorporação do Anef reduz a consistência das argamassas de forma expressiva. A distribuição granulométrica tem forte influência neste parâmetro, pois arranjos mais porosos e com pior empacotamento, bem como frações mais finas e com maior área superficial, implicam em um menor espalhamento refletindo na redução da consistência observada[24].

Os resultados das densidades de massa, no estado fresco e endurecido, também sofreram uma redução com o aumento da incorporação do Anef, que possui valores inferiores de massa específica e de massa unitária. Além disso, pode ter influência dos efeitos da distribuição granulométrica, onde observou-se para o Anef um pior arranjo de partículas, o que pode auxiliar na redução das densidades observadas, podendo também, ter proporcionado uma maior incorporação de ar[25].

No ensaio de tração na flexão, as argamassas apresentaram comportamento semelhante, tanto na tração na flexão quanto na compressão, com o aumento do teor de Anef. Observa-se, uma tendência de aumento da resistência mecânica com o incremento de até 70% de Anef e uma queda com valores acima desse. Além disso, os resultados similares entre o traço de referência (T0) e o traço com 100% de resíduo

(T100), indicam a possibilidade e a viabilidade de uma substituição total do agregado natural pelo resíduo da nefelina, em relação às propriedades mecânicas analisadas.

4 | CONCLUSÕES

De acordo com as análises realizadas e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que resíduo oriundo da nefelina sienito, Anef, possui algumas propriedades físicas semelhantes ao agregado natural Anat. No entanto, houve diferenças significativas para a massa unitária e distribuição granulométrica quais podem ter forte influência nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Em relação a análise química, os agregados possuem predominância por sílica e alumina, mas com concentrações distintas. Em relação ao estado fresco, as argamassas demandam maior quantidade de água para manter sua consistência, à medida que se aumenta o teor de incorporação do Anef. Ambas as densidades, no estado fresco e endurecido, também reduzem com a maior incorporação de resíduo. E por fim, os resultados mecânicos indicam uma tendência de aumento da resistência, podendo, inclusive, substituir o agregado natural integralmente pelo resíduo da nefelina. A incorporação do Anef se mostrou, inicialmente, como uma alternativa promissora como agregado para a produção de argamassas de assentamento, contribuindo também para a redução de impactos ambientais dos setores da construção civil e da mineração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas parceiras: Grupo Rio Deserto Mineração, Cerro Branco e Supremo Cimentos, pela doação dos insumos, e aos laboratórios das instituições da UNESC e do IFSC.

REFERÊNCIAS

1. VIEIRA, B. A.; NOGUEIRA, L. Construção civil: crescimento versus custos de produção civil. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, 13, n. 3, 2018, p. 366-377.

2. LARUCCIA, M. M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **ENIAC Pesquisa**, Guarulhos (SP), 3, n. 1, jan.-jun. 2014, p. 69-84.

3. ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **O Mercado de Agregados no Brasil**. São Paulo: ANEPAC, 2015.

4. IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 – Ano base 2019**. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2020. 80p.

5. VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Lavra de rochas ornamentais**. CETEM/MCTI – Tec. de Rochas Ornamentais: Pesquisa, lavra e beneficiamento, Rio de Janeiro, 2014, p. 153 – 257.

6. JENA, S. K.; DHAWAN, N.; RAO, D.S.; MISRA, P. K.; MISHRA, B.K.; DAS, B. Studies on extraction of potassium values from nepheline syenite. **International Journal of Mineral Processing**. 133, 2014, p.13–22.

7. AIRES, U. R. V.; SANTOS, B. S. M.; COELHO, C. D. C.; SILVA, D. D.; CALIJURIB, M. L. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Land Use Policy**, 70, 2018, p. 63–70.

8. GUREVICH, B.I.; KALINKINA, E.V.; KALINKIN, A. M. Geopolymer binder based on mechanically acatívated compositions of magnésia-ferrous slag and nepheline. **Minerals**, 10, 2020, p. 48-65.

9. SONG, Y.; ZHANG, H. Research on sustainability of building materials. **Materials Science and Engineering**, 452, 2018, p. 1-5.

10. SANTOS, D. H. **Substituição total do agregado natural por quartzito friável para produção de argamassas mistas de assentamento e revestimento**. 128p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2015.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**. Agregado – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**. Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

16. CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. v. 1. 4ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2011.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: 2016.

18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

19. 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: ABNT, 2005.

20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

21. CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, 64, 2018, p. 288-300.

22. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Hasparyk. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2014, 782p.

23. CASALI, J. M.; MIGUEL, T. F.; FELIZARDO, C. C.; MEIRA, N. DOS S.; DOMINGUINI, L.; BETIOLI, A. M. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, 2018, p. 261-279.

24. CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, n.3, 2016, p. 714 –732.

25. NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. Boletim Técnico da USP, São Paulo: EPUSP, 2004.



INFLUÊNCIA DA MAGNETITA E DA BARITA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081130

MAZZARO; FILIPE S.[1]; ALVES; JORDANE G.S.[1]; ALMEIDA; FERNANDO C.R.[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: FERNANDO@DEMC.UFMG.BR

RESUMO: O uso de resíduos industriais em produtos da construção civil é uma alternativa para contribuir com o desenvolvimento sustentável. O concreto pesado, comumente utilizado para blindagem de radiação em usinas nucleares e hospitais, tem sido objeto de estudos a partir da utilização de rejeitos da mineração, tais como barita e magnetita. Este artigo buscou apresentar uma revisão sistemática da literatura sobre a influência desses rejeitos em matrizes cimentícias por meio da metodologia ProKnow-C adaptada. Após análise da literatura, verificou-se que a alteração das propriedades físicas do concreto pode levar à melhoria de parâmetros de durabilidade, principalmente quando expostos a elevadas temperaturas.

PALAVRAS-CHAVES: Magnetita, barita, concreto pesado, rejeito.

ABSTRACT: The use of industrial waste in civil construction products is an alternative to contribute to sustainable development. heavyweight concrete, commonly used for radiation shielding in nuclear power plants and hospitals, has been the subject of studies based on the use of mining waste, such as barite and magnetite. This article sought to present a systematic literature review on the influence of these tailings in cementitious matrices through the adapted ProKnow-C methodology. After analyzing the literature, it was found changing the physical properties of concrete can lead to improved durability parameters, especially when exposed to high temperatures.

KEYWORDS: Magnetite, barite, heavyweight concrete, tailings.

1 | INTRODUÇÃO

O concreto demanda, anualmente, cerca de 30 gigatoneladas de materiais[(1)]. Desse valor, 4 gigatoneladas corresponde ao cimento, cuja produção é responsável pela emissão de gases poluentes[(2)]. Somente a produção do concreto é responsável por 8% das emissões dos gases que agravam o efeito estufa[(1)]. Nesse contexto, a sociedade deve buscar alternativas que visam à redução dos impactos causados ao meio ambiente[(3)]. O aproveitamento de rejeitos da mineração em matrizes cimentícias, por exemplo, é uma solução para mitigar esse impacto ambiental. Em 2019, a indústria da mineração, no Brasil, produziu mais de 1 milhão de toneladas das principais substâncias metálicas[(4)]. Dentre alguns rejeitos gerados no beneficiamento de minérios, destacam-se aqueles ricos em magnetita (Fe_3O_4) e barita ($BaSO_4$), os quais apresentam potencial uso em concreto pesado, dada a alta massa específica[(5,6,7,8,9)]. Nesse cenário, a avaliação da durabilidade é essencial para garantir a função a qual se destina, a

vida útil e o desempenho[5]. Portanto, o objetivo desse estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura acerca da durabilidade de concretos pesados com a presença da magnetita e/ou da barita. A fim de alcançar tal objetivo, utilizou-se a metodologia ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist)* adaptada para realizar o levantamento do portfólio bibliográfico.

2 | METODOLOGIA

A revisão sistemática da literatura é definida como uma síntese de estudos primários que contém objetivos, materiais e métodos claramente explicitados, sendo conduzida de acordo com uma metodologia clara e reprodutível[10]. O levantamento da literatura foi baseado na metodologia ProKnow-C[11]. Essa metodologia consiste na seleção do portfólio bibliográfico, na análise bibliométrica, na análise sistêmica e na elaboração dos objetivos da pesquisa[12]. Neste estudo foram realizadas somente as etapas de definição das palavras-chave, exclusão de artigos repetidos, alinhamento quanto ao título, ao resumo e à leitura integral, classificação quanto ao número de citações e a identificação dos autores com maior número de publicações.

O portfólio bibliográfico foi levantado no Portal de Periódicos CAPES, sem nenhuma adoção de base de dados específica. Inicialmente, foram definidas as palavras-chave a serem adotadas na busca do referencial bibliográfico, combinadas por meio de operadores booleanos. As palavras-chave adotadas foram "*barite*" AND "*mortar*", "*barite*" AND "*durability*", "*barite*" AND "*concrete*", "*magnetite*" AND "*mortar*", "*magnetite*" AND "*durability*", "*magnetite*" AND "*concrete*". Em seguida, foram utilizados os seguintes filtros de busca: data de publicação entre 01/04/2016 e 01/04/2021, tipo de material considerado somente artigo, revisados por pares e, por fim, ordenados por relevância. Alguns critérios de inclusão foram adotados, como o uso da magnetita/barita em concretos e/ou argamassas e o uso da magnetita/barita como adição ou substituição de agregados e de cimento. O critério de exclusão adotado se restringiu àqueles artigos que analisaram somente a proteção radiológica ou os parâmetros mecânicos, mas sem avaliar a durabilidade do material.

Após o uso das palavras-chave definidas e dos filtros utilizados no Portal de Periódicos CAPES, foi realizado um levantamento do quantitativo de artigos. Nota-se, a partir da Tabela 1, que foram obtidos 4.374 artigos. Esse número se deve ao fato da escolha de termos mais abrangentes. Ao utilizar termos mais específicos, a base de dados encontrou poucos estudos, como o termo "*barite*" AND "*magnetite*" AND ("*concrete*" OR "*mortar*"), que resultou somente em 20 artigos. Após essa etapa, verificou-se o alinhamento do título, do resumo e da leitura integral ao objetivo do estudo.

Palavra-chave	Nº de artigos	Nº de artigos após aderência ao título	Nº de artigos após aderência ao resumo	Nº de artigos após a leitura integral
“barite” AND “mortar”	327	47	20	1
“barite” AND “durability”	179	45	23	5
“barite” AND “concrete”	386	67	47	6
“magnetite” AND “mortar”	1.344	95	29	4
“magnetite” AND “durability”	1.081	69	20	3
“magnetite” AND “concrete”	1.057	54	42	8

Tabela 1 – Testes de aderência

Fonte: Dados da pesquisa

Assim, após a realização dos procedimentos descritos, foram encontrados 12 artigos relacionados ao rejeito de barita e 15 artigos relacionados ao rejeito da magnetita, totalizando 27 artigos relativos ao tema da pesquisa. Essas publicações com os respectivos números de citações, segundo o Google Scholar, são apresentados na Tabela 2.

A análise bibliométrica busca evidenciar informações acerca do portfólio bibliográfico pela análise e pela quantificação de suas características[13]. Após o levantamento realizado, destacam-se o periódico *Construction and Building Materials* (12 artigos), *Materials* (4 artigos) e *Nanotechnologies in Construction* (2 artigos).

No que diz respeito aos autores, três se destacaram: Elzbieta Horszczaruk[5,6,17,22,23] e Pawel Sikora[6,22,23,32,33] (5 artigos), e Michał A. Glinicki[7,9,35] (3 artigos), todos da Polônia. Cabe salientar que Elzbieta Horszczaruk e Pawel Sikora são autores da publicação com o maior número de citações[6], evidenciando a relevância do levantamento bibliográfico realizado.

3 | DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

A principal análise de durabilidade realizada diz respeito ao dano provocado ao concreto sob elevadas temperaturas. Isso está relacionado ao fato do concreto pesado ser comumente utilizado em usinas nucleares, onde, normalmente, a temperatura gerada pelo vapor d´água pode chegar a 350°C e, em casos de acidentes, entre 500°C e 1.000°C[22].

Autores	Ano	Citações	Palavras-chave
Horszczaruk *et al*.[6]	2017	71	Nanosilica, Cement mortar, Elevated temperature, Mechanical properties, Heavyweight aggregate
Aksogan *et al*.[14]	2016	57	Corn stalk ash, Wheat straw ash, Sunflower stalk ash, Colemanite, Barite
Radu *et al*.[15]	2017	34	Heavyweight concrete, density, linear attenuation coefficient, compressive strength
Yao *et al*.[16]	2017	24	Heat-treatment temperature, Dynamic uniaxial compressive strength, SHPB, Thermally induced damage, X-ray micro-CT, Loading rate
Horszczaruk[17]	2019	21	Cement-based composites, Magnetite nanoparticles, Mechanical properties, Functional properties, Hydration products
González-Ortega *et al*.[18]	2019	18	EAF slag, Durability, Concrete Wetting-drying cycles, Freeze-thaw Leaching
Horszczaruk e Brzozowski[5]	2019	17	Gamma ray shielding, Heavyweight concrete, High temperature, Compressive strength
Sevinç *et al*.[19]	2017	16	Barite, Colemanite, Pumice, Blast furnace slag, Concrete Engineering properties, Taguchi method
Aslani e Asif[20]	2019	15	Geopolymer concrete, Heavyweight geopolymer concrete, Magnetite aggregates, Normal- weight coarse aggregates, High temperatures
El-Samrah *et al*.[21]	2018	14	Heating effect, Concrete, Integrated fast neutrons removal macroscopic cross section, Total linear attenuation coefficie
Sikora *et al*.[22]	2019	14	Waste magnetite poder, Cement paste, Heat treatment, Thermal resistance, Gamma-ray shielding
Sikora *et al*.[23]	2018	14	Nanosilica, Nanomagnetite, Core-shell structure, Cement mortar, Elevated temperature, Stöber method
Zalegowski *et al*.[24]	2020	14	Radiation shielding, Neutron radiation, Microstructure, Image analysis, Multiple regression analysis, Magnetite, Gadolinium
El-Samrah *et al*.[25]	2018	13	High performance concrete, Radiation shielding, Mass attenuation coeficiente, WinXcom program
Aslani *et al*.[26]	2019	12	Fire performance, Heavyweight concrete, Self-compacting concrete, High strength concrete, Heavyweight self-compacting concrete, Heavyweight high strength concrete, Mechanical properties
Demir *et al*.[27]	2020	10	Shielding of gamma rays and nêutrons, Concrete Shields, Limestone, Barite, Siderite, High temperature, Residual compressive strength
Arel *et al*.[28]	2017	10	NPP, Safety, Ageing, Concrete, Chemical attack, Physical attack

Jaskulski *et al*.[7]	2019	9	Blended aggregate,Concrete mix design,Density,Non-stationary method,Open porosity, Thermal properties,Thermal conductivity, Specific heat, Radiation shielding
Beaucour *et al*.[29]	2020	8	Electric Arc Furnace slag, Heavyweight concrete, Barite aggregate, Temperature, Compressive strength, Dynamic modulus, Recycle, Thermal conductivity
Jozwiak-Niedzwiedzka *et al*.[9]	2018	6	Alkali-silica reaction, Heavyweight concrete, High-density aggregate, Quartz size, Radiation shielding, Reactive minerals
El-Sayed[30]	2021	0	Heavy weight concrete, Magnetite, Rice straw ash (RSA), Radiation, Nano materials
Rashid *et al*.[31]	2020	0	Elevated temperature, Magnetite, Radiation, Radiation shielding, Silica sand, Ultra-high performance concrete
Dragomirová *et al*.[8]	2020	0	Cementitious composites,· Hydration heat, Heavyweight concrete, Aggregates, Radioactive isotope, Mechanical properties, Thermophysical properties
Sikora[32]	2020	0	Cement mortar, Nanosilica, Elevated temperature, Thermal properties, Cracking
Sikora[33]	2020	0	Cement mortar, Nanosilica, Elevated temperature, Thermal properties, Cracking
Ahmad *et al*.[34]	2019	0	Normal concrete, Barite concrete, Compressive strength, Tensile strength, Elastic modulus, Radiation shielding.
Jóźwiak-Niedźwiedzka *et al*.[35]	2020	0	Chloride permeability, Carbonation, Slag cement, Radiation shielding concrete, Microstructure, MIP, Mix design, Portland cement, Magnetite

Tabela 2 – Portfólio Bibliográfico

El-Samrah *et al*.[25], ao utilizarem barita em substituição ao agregado graúdo, observaram que a perda de massa a 450°C chegou a 5,3%. Porém, a perda de resistência à compressão atingiu 48%, que representa menos de 20 MPa. Horszczaruk e Brzozowski[5] analisaram a barita e a magnetita em substituição aos agregados graúdos e miúdos. O desempenho das amostras foi satisfatório até 600°C, notando-se que o concreto com barita apresentou resultados inferiores à magnetita. Sikora *et al*.[22] analisaram a substituição do cimento pela magnetita em percentuais entre 5 e 30%. A perda de massa foi semelhante até 300°C. Acima desse valor, o melhor desempenho foi observado em maiores teores de magnetita. Esses resultados foram confirmados pela resistência à compressão, que demonstrou melhor desempenho das amostras com maiores teores de magnetita[23].

O bom desempenho de compósitos cimentícios com rejeitos de minerais pesados, expostos a elevadas temperaturas, pode estar relacionado também ao aumento da porosidade. Jaskulski *et al*.[7] verificaram que o uso desses minerais provocou aumento da porosidade aberta entre 1,2 e 2,3%. Resultado semelhante foi obtido por Beaucour *et al*.[29], Zalegowski *et al*.[24]polypropylene macro- or/and microfibers, acrylic dispersion, acrylic dispersion together with gadolinium oxide, epoxy dispersion, and finally the inorganic chemical compound containing boron (NaBH4 e Dragomirová *et al*.[8].

Por meio da técnica de ultrassom, El-Samrah *et al*.[21] verificaram que a velocidade do pulso reduziu, a 450°C, cerca de 90%. Sevinç *et al*.[19]mechanical and durability

properties of concrete in recent years. In this study four different mineral additives were used which are barite, colemanite, basaltic pumice and ground granulated blast furnace slag (BFS, ao realizarem substituições parciais de 2,5, 5 e 10% de barita como agregado miúdo, observaram que a velocidade do pulso aumenta ligeiramente à medida que o percentual de barita é acrescido. Demir *et al*.[27] obtiveram resultados semelhantes ao substituírem totalmente os agregados graúdos e miúdos por barita. Esse aumento da velocidade do pulso ultrassônico pode estar relacionado a uma maior densificação da matriz cimentícia pelo aumento da massa específica dos minerais utilizados.

Além desses ensaios, outros parâmetros de durabilidade foram analisados, mas em menor quantidade, devido à escassez de estudos na área. Quanto à carbonatação, amostras com barita apresentaram menor profundidade quando comparadas a outros materiais[18]. Tal efeito foi consistente com os resultados de penetração de água, visto que amostras com maior absorção de água apresentaram menor profundidade de carbonatação. Por outro lado, amostras com magnetita apresentaram pior desempenho quando comparadas às amostras de referência[35]. Sobre a penetração de cloretos, o maior coeficiente de migração foi observado nas amostras com magnetita[35], sendo este trabalho o único encontrado na literatura recente sobre o tema. Em relação ao ciclo do gelo-degelo, as amostras com barita apresentaram desempenho inferior ao material de referência, tanto em função da velocidade do pulso ultrassônico, quanto da resistência à compressão[18]. Relativamente à porosidade, apesar de não haver consenso, nota-se que, majoritariamente, as amostras com barita e/ou magnetita apresentaram porosidade superior à amostra de referência[5,18,24,35].

Assim, os resultados referentes à análise de durabilidade ainda são inconclusivos e não consensuais, evidenciando, portanto, uma lacuna acerca do estudo de concretos com rejeitos pesados expostos a diversos ambientes agressivos.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual contexto exige que a sociedade busque alternativas relativas à redução da emissão de gases poluentes ao meio ambiente. Portanto, esse estudo buscou realizar uma revisão sistemática da literatura acerca da durabilidade de matrizes cimentícias com rejeitos à base de magnetita e barita. Verificou-se que a alteração das propriedades físicas dos concretos e argamassas pode levar à melhoria da durabilidade, principalmente quando expostos a elevadas temperaturas. Porém, estudos complementares são necessários, haja vista as inúmeras possibilidades de alterações da composição das misturas e as diversas condições de exposição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DEMC/UFMG e ao PIBIT/CNPq/UFMG pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. MILLER, S. A.; MOORE, F. C. Climate and health damages from global concrete production. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 5, p. 439–443, 2020.

2. HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment**, v.1, n.11, 559–573, 2020.

3. GHAVAMI, S. et al. Influence of sodium chloride on cement kiln dust-treated clayey soil: strength properties, cost analysis, and environmental impact. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 1, p. 683–702, 2021.

4. BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas.** Brasília, 2020.

5. HORSZCZARUK, E.; BRZOZOWSKI, P. Investigation of gamma ray shielding efficiency and physicomechanical performances of heavyweight concrete subjected to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 574–582, 2019.

6. HORSZCZARUK, E. et al. The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 420–431, 2017.

7. JASKULSKI, R. et al. Application of a non-stationary method in determination of the thermal properties of radiation shielding concrete with heavy and hydrous aggregate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 130, p. 882–892, 2019.

8. DRAGOMIROVÁ, J. et al. Optimization of cementitious composite for heavyweight concrete preparation using conduction calorimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 142, n. 1, p. 255–266, 2020.

9. JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, D. et al. Alkali-silica reactivity of high density aggregates for radiation shielding concrete. **Materials**, v. 11, n. 11, 2018.

10. GREENHALGH, T. How to read a paper: Papers that summarise other papers (systematic reviews and meta-analyses). **BMJ**, v. 315, 1997.

11. ENSSLIN, L. et al. **ProKnow-C, Knowledge Development Process- Constructivist. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI**. Brasil, 2010a.

12. 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.2,47–62, 2012.

13. ENSSLIN, L. et al. **Processo de análise bibliométrica. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI, 2010b.**

14. AKSOGAN, O.; BINICI, H.; ORTLEK, E. Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes. **Construction and Building Materials**,106,253–263, 2016.

15. RADU, L. et al. Betoane cu capacitate de ecranare a radiațiilor gama pentru construcții speciale. **Romanian Journal of Materials**, v. 47, n. 3, p. 322–327, 2017.

16. YAO, W. et al. Thermal degradation of dynamic compressive strength for two mortars. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 139–152, 2017.

17. HORSZCZARUK, E. Properties of cement-based composites modified with magnetite nanoparticles: A review. **Materials**, v. 12, n. 2, 2019.

18. GONZÁLEZ-ORTEGA, M. A. et al. Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 543–556, 2019.

19. SEVINÇ, A. H.; DURGUN, M. Y.; EKEN, M. A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 343–351, 2017.

20. ASLANI, F.; ASIF, Z. Properties of ambient-cured normal and heavyweight geopolymer concrete exposed to high temperatures. **Materials**, v. 12, n. 5, 2019.

21. EL-SAMRAH, M. G.; ABDEL-RAHMAN, M. A. E.; EL SHAZLY, R. M. Effect of heating on physical, mechanical, and nuclear radiation shielding properties of modified concrete mixes. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 153, n. September, p. 104–110, 2018.

22. SIKORA, P. et al. Incorporation of magnetite powder as a cement additive for improving thermal resistance and gamma-ray shielding properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 113–121, 2019.

23. SIKORA, P. et al. The effects of Fe_3O_4 and Fe_3O_4/SiO_2 nanoparticles on the mechanical properties of cement mortars exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 441–450, 2018.

24. ZALEGOWSKI, K. et al. Relation between microstructure, technical properties and neutron radiation shielding efficiency of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117389, 2020.

25. EL-SAMRAH, M. G.; ABDEL-RAHMAN, M. A. E.; KANY, A. M. I. Study Characteristics of New Concrete Mixes and their Mechanical, Physical, and Gamma Radiation Attenuation Features. **Zeitschrift fur Anorganische und Allgemeine Chemie**, v.644,n.2,p.92–99, 2018.

26. ASLANI, F.; HAMIDI, F.; MA, Q. Fire performance of heavyweight self-compacting concrete and heavyweight high strength concrete. **Materials**, v. 12, n. 5, p. 1–24, 2019.

27. DEMIR; GÜMÜŞ, M.; GÖKÇE, H. S. Gamma ray and neutron shielding characteristics of polypropylene fiber-reinforced heavyweight concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

28. AREL, H. Ş.; AYDIN, E.; KORE, S. D. Ageing management and life extension of concrete in nuclear power plants. **Powder Technology**, v. 321, p. 390–408, 2017.

29. BEAUCOUR, A. L. et al. Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119385, 2020.

30. EL-SAYED, T. A. Performance of heavy weight concrete incorporating recycled rice straw ash as radiation shielding material. **Progress in Nuclear Energy**, v.135, p.103693, 2021.

31. RASHID, R. S. M. et al. Effect of elevated temperature to radiation shielding of ultra-high performance concrete with silica sand or magnetite. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120567, 2020.

32. SIKORA, P. The microstructural and thermal characteristics of silica nanoparticle-modified cement mortars after exposure to high temperatures. Part ii. **Nanotechnologies in Construction**, v. 12, n. 3, p. 147–154, 2020a.

33. SIKORA, P. The microstructural and thermal characteristics of silica nanoparticle-modified cement mortars after exposure to high temperatures. Part i. **Nanotechnologies in Construction**, v. 12, n. 2, p. 108–115, 2020b.

34. AHMAD, I. et al. Densification of concrete using barite as fine aggregate and its effect on concrete mechanical and radiation shielding properties. **Journal of Engineering Research (Kuwait)**, v. 7, n. 4, p. 81–95, 2019.

35. JÓŹWIAK NIEDŹWIEDZKA, D. et al. Influence of slag cement on the permeability of concrete for biological shielding structures. **Energies**, v. 13, n. 17, 2020.

UTILIZAÇÃO DE CINZA PESADA DE BIOMASSA DE PINUS TAEDA COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NO CONCRETO CONVENCIONAL

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081131

BARCAROLI; BRUNO CRIMAROSTI; SALAMONI; NATÁLIA; ROHDEN; ABRAHÃO BERNARDO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU - FURB.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ABRCIVIL@GMAIL.COM

RESUMO: Com a evolução das cidades, há uma maior geração de resíduos sólidos, que são depositados em aterros sanitários ou de maneira incorreta, no meio ambiente. Com a intenção de reduzir esse impacto e proteger os recursos naturais da produção de cimento Portland, esta pesquisa analisa a substituição parcial de cimento pelas cinzas pesadas provenientes da combustão do *Pinus Taeda* em concreto convencional. Para isso, amostras de concreto e argamassa foram moldadas, e algumas propriedades físicas foram determinadas. A partir dos resultados encontrados, constatou-se que a substituição de até 10% pela cinza apresenta valores satisfatórios em relação ao traço referência.

PALAVRAS-CHAVES: Concreto convencional, cinza de *Pinus Taeda*, combustão, pozolana.

ABSTRACT: With the evolution of cities, there is a greater generation of solid waste, which is deposited in landfills or incorrectly, in the environment. With the intention of reducing this impact and protecting the natural resources of Portland cement production, this research analyzes the partial replacement of cement by heavy ash from the combustion of *Pinus Taeda* in conventional concrete. For this, samples of concrete and mortar were molded, and some physical properties were determined. From the results found, it was concluded that the substitution of up to 10% by ash presents satisfactory values in relation to the reference mixture.

KEYWORDS: Conventional concrete, ash from *Pinus Taeda*, combustion, pozzolan.

1 | INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados do mundo. Entretanto, sua produção causa sérios impactos ambientais, como a escassez dos recursos naturais empregados e o aumento da emissão de dióxido de carbono (CO_2). A utilização do cimento pode ser diminuída com o emprego materiais alternativos, substituindo parcialmente o cimento em argamassa e concreto, reduzindo os danos ambientais causados pela fabricação do cimento [1].

Mas não é só a indústria cimentícia que gera impactos ambientais. Outras indústrias, como siderúrgicas e agroindústrias, geram rejeitos que devem ser destinados corretamente à aterros sanitários. Entretanto, com alguns estudos, esses rejeitos podem vir a serem aplicados em outros processos ou indústrias, tornando-se resíduos e contribuindo com os aspectos ambientais desses processos. Materiais cimentícios

alternativos podem advir desses resíduos.

As cinzas de origem vegetal podem ser utilizadas como adição mineral ao cimento Portland quando possuírem uma quantidade predominante de sílica no estado amorfo e apresentarem finura adequada [1]. Algumas cinzas têm suas propriedades pesquisadas para a substituição parcial do cimento, como cinza da casca do arroz [2] e cinza do bagaço da cana de açúcar [3-4].

Com intuito de estudar um novo material cimentício, reutilizando um resíduo da indústria madeireira, investiga-se a possibilidade da substituição parcial do cimento Portland por cinza de fundo de *Pinus Taeda,* proveniente da sua combustão, no concreto convencional. São verificadas as propriedades mecânicas do concreto convencional perante a adição da cinza e ainda ao efeito Spalling. Submeter o concreto estudado à altas temperaturas é importante, pois o material sofre transformação em sua estrutura, podendo levar à sua deterioração [5].

2 | MATERIAIS E MÉTODO

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (CPs) de concreto, para caracterização física e mecânica, e análise ao spalling, e CPs de argamassa, para verificação do desempenho do cimento[6] e atividade pozolânica[7]. Os materiais utilizados para a pesquisa foram: cimento Portland CP II-Z-40 (Votoran) e CP II-F-32 (Cauê); cal hidratada CH-III (Cibracal) com massa específica de 2,30 g/cm³ e massa unitária no estado solto de 0,50 g/cm³; agregado miúdo com módulo de finura de 2,21 e massa específica de 2,46 g/cm³; agregado graúdo com dimensão máxima característica de 19 mm, módulo de finura de 8,04 mm e massa específica 2,86 g/cm³.

A cinza proveniente da queima do Pinus Taeda foi coletada em uma indústria madeireira da cidade de Caçador/SC. A secagem da madeira dentro da estufa ocorre a uma temperatura aproximada de 76°C, com tempo de permanência de 10 a 81 h, dependendo da sua espessura. Para atingir tal temperatura, o queimador é abastecido por cavaco de pinus, com cerca de 500°C de temperatura de combustão.

O resíduo no estado natural foi utilizado na mistura do concreto, com dimensão máxima característica de 19 mm, módulo de finura do material de 1,37 e massa específica de 2,20 g/cm³ [8]. Já, para a argamassa, após a coleta no queimador, o resíduo passou por um processo de moagem em Abrasão Los Angeles, com relação carga resíduo de 1x5, durante 3 h. O produto resultante é passante na peneira de 75 µm e retido na peneira 45 µm.

2.1 Concreto

O método de dosagem utilizado para o concreto foi o ACI 211 [9], para 30 MPa e abatimento de 25 a 50 mm. Quatro traços foram executados: referência (0% de cinza), 5%, 10%, 15% e 20% de substituição do cimento Portland pela cinza da combustão do pinus (Tabela 1).

Materiais	Porcentagem de adição da cinza de pinus				
	0%	5%	10%	15%	20%
CP II-Z-40	351,8	334,3	316,7	299,1	281,5
Agregado Graúdo	1123,8	1123,8	1123,8	1123,8	1123,8
Agregado Miúdo	701,7	701,7	701,7	701,7	701,7
Cinza de *Pinus Taeda*	0	8,7	17,3	26,0	34,7
Água	190	190	190	190	190

Tabela 1 - Traços de concreto (kg/m³)

A execução do concreto foi realizada com o auxílio de betoneira de 120 litros, seguido de ensaio de abatimento, moldagem, desmoldagem e cura submersa em tanque com água e cal. Antes dos ensaios, os CPs foram secos em estufa por 24 h. 15 CPs foram expostos à 600°C em forno mufla, e posteriormente foram realizados ensaios de perda de massa e análise de fissuras, absorção por capilaridade e resistência à compressão axial. Os 120 CPs que não foram expostos à 600°C, passaram por ensaios de absorção de água por capilaridade e resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral (Figura 1).



Figura 1 – Fluxograma dos traços de concreto com adição de cinza da combustão do pinus

2.2 Argamassa

A caracterização da cinza foi realizada através de ensaios com argamassa. Foram realizados três traços de argamassa, com e sem utilização de cinza da combustão do pinus [6], e um terceiro traço com a cinza e cal hidratada, para avaliação da atividade pozolânica [7] (Tabela 2).

Material	Referência [6]	Cinza de pinus [6]	Cal hidratada [7]
CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4	-
Cinza de *Pinus Taeda*	-	156 ± 0,2	268
Areia Normal [10]	1872	1872	1872
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Hidróxido de cálcio	-	-	104

Tabela 2 - Traços de argamassa (g)

Posteriormente à mistura em argamassadeira e ensaio de índice de consistência, os CPs foram moldados [11]. Após 24 h, os traços de referência e com cinza de pinus, são desmoldados e deixados em cura submersa com água e cal até ensaio de resistência à compressão axial [6]. Já, para o traço de cal hidratada, passadas as 24 h da moldagem, os CPs continuaram nos moldes e são levados à estufa à 55°C, permanecendo lá por 6 dias, até ensaio de compressão[7].

3 | RESULTADOS

3.1 Concreto

Para os traços com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de cimento pela cinza proveniente da combustão do pinus, os abatimentos encontrados foram, respectivamente, 27,5, 25, 48, 25 e 35 mm. Como na dosagem do concreto foi determinado o abatimento de 25 a 50 mm, os abatimentos encontrados atenderam o intervalo estipulado, não sendo necessário realizar qualquer tipo de correção.

3.1.1 Perda de massa e análise de fissuras

Os ensaios de perda de massa e análise de fissuram foram realizados em todos os CPs expostos à 600°C. A perda de massa se deu pela diferença de massa antes e após a exposição dos CPs a 600°C. Após ensaio, a perda de massa para os traços de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição do cimento Portland pela cinza estudada foram de respectivamente: 5,81%, 7,52%, 7,24%, 7,81% e 6,95%. A maior perda de massa foi encontrada no traço com 15% de substituição, com 287,46 g de diferença de massa antes e após a exposição.

A análise de fissuras foi feita de forma aleatória, nas regiões superior, intermediaria e inferior de cada um dos CPs, com auxílio de um fissurômetro (Figura 2). Foram encontradas e quantificadas fissuras de 0,1 a 0,3 mm de espessura (Figura 3Figura 2), com maior incidência das fissuras menores. Ainda, vale ressaltar que não houve desplacamento de concreto dos CPs.

3.1.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado nos 15CPs expostos a 600°C e em 30 CPs que não passaram por elevação de temperatura (23°C) [12].



Figura 2 – Corpos de prova após análise de fissuração

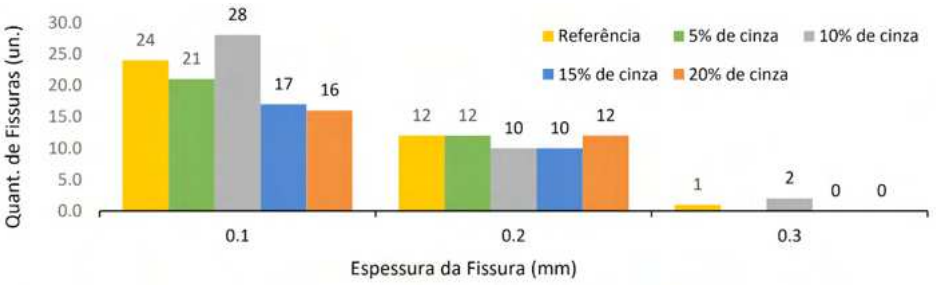


Figura 3 – Quantitativo das fissuras encontradas

Observa-se através do ensaio que os CPs não expostos à 600°C (Figura 4) apresentaram valores mais reduzidos de absorção de água por capilaridade do que os expostos a 600°C (Figura 5). Ainda referente aos CPs com exposição a altas temperaturas, os diferentes traços obtiveram uma evolução mais uniforme da absorção durante o tempo.

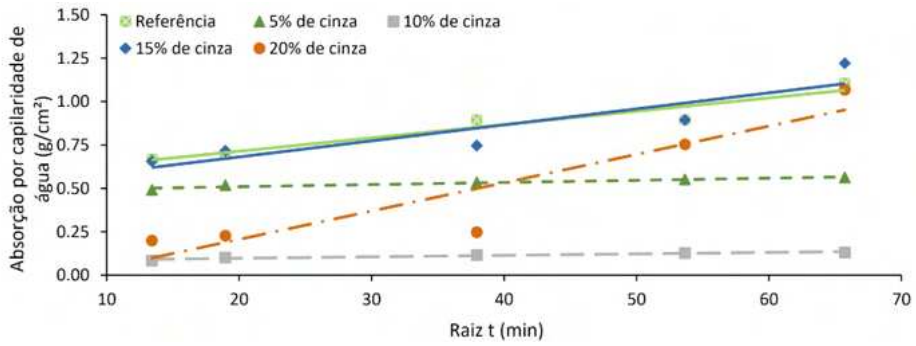


Figura 4 – Absorção de água por capilaridade no concreto sem exposição a 600°C

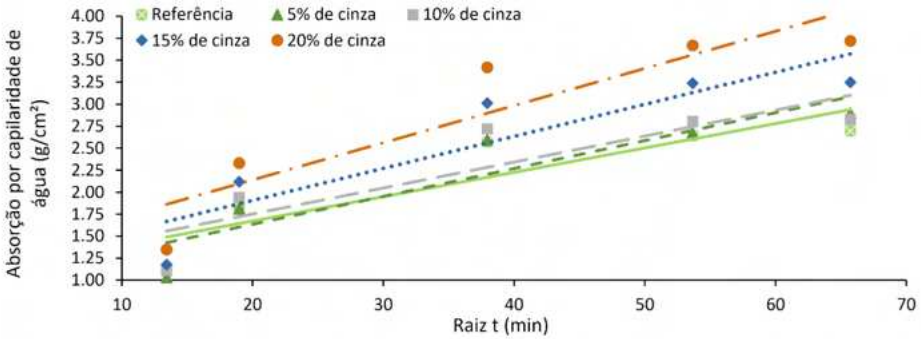


Figura 5 – Absorção de água por capilaridade no concreto com exposição a 600°C

3.1.3 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência a compressão axial foi realizado nos 15 CPs expostos a 600°C aos 28 dias de idade, e em 60 CPs sem a exposição a altas temperaturas, com 30 CPs ensaiados aos 9 dias e outros 30 CPs aos 28 dias de idade (Figura 6).

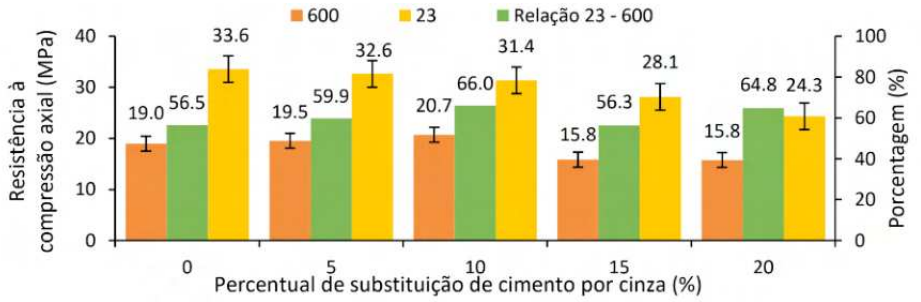


Figura 6 – Resistências características à compressão axial

A dosagem desses traços foi realizada para resistência característica de 30 MPa, e apenas os traços referência (0%), 5 % e 10% de substituição mantiveram a resistência desejada, quando analisados a sem exposição à 600°C (23°C). Como já era esperado, observa-se redução da resistência dos CPs expostos à 600°C, com maiores reduções para os traços referência e 15%.

3.1.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os CPs ensaiados para resistência à tração por compressão diametral não sofreram exposição à temperatura a 600°C, e foram rompidos aos 14 e 28 dias (Figura 7). Como os concretos convencionais apresentam resistência à tração em torno de 10% da resistência à compressão axial[9], os resultados foram satisfatórios para os traços

de concreto com até 10% de substituição, assim como para o ensaio de resistência a compressão axial.

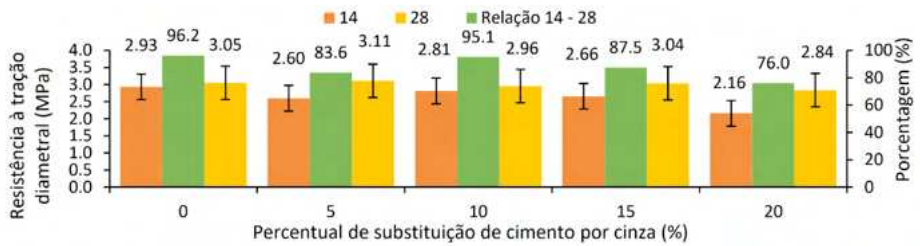


Figura 7 – Resistências à tração diametral

3.2 Argamassa

O índice de consistência da argamassa de cal hidratada foi de 220 mm [7], sendo que o limite especificado em norma é de 225 ± 5 mm. Logo, o espalhamento encontrado respeitou o intervalo de abatimento da norma. Para ensaio de desempenho das argamassas, todos os CPs moldados foram ensaiados à compressão axial (Tabela 3).

Argamassa	Resistência à compressão axial média (MPa)
Referência	20,2
Cinza de *Pinus Taeda*	8,4
Cal hidratada	2,0

Tabela 3 – Resistência à compressão axial da argamassa

Para o material ser considerado pozolânico, a relação entre as médias das resistências à compressão axial do traço referência com o traço de cinza de *Pinus Taeda* precisaria ser igual ou superior a 90% [13]. Entretanto, o resultado encontrado foi de 42%, inferior ao exigido por norma. Outro fator que deve ser levado em consideração é que a média dos CPs de cal hidratada precisa ser igual ou superior a 6 MPa [13]. Contudo, obteve-se 2 MPa.

4 | CONCLUSÃO

No ensaio de índice de fissuras, os CPs expostos a 600°C apresentaram uma maior absorção em relação aos que não foram expostos (23°C). Ainda, apresentaram maior absorção de água por capilaridade e maior perda de massa, se comparado aos que não foram submetidos à elevação de temperatura. Para os ensaios de compressão axial, os CPs com substituição parcial do cimento de 10% pela cinza pesada proveniente da combustão do *Pinus Taeda*, mantiveram os resultados de um traço referência sob temperatura ambiente (23°C). Já, os CPs expostos a 600°C, apresentaram redução da resistência característica, pois as propriedades do concreto são perdidas ao serem

submetidos a elevação de temperatura.

Em relação aos estudos realizados com argamassa, o material não é considerado Pozolânico, pois os resultados encontrados são inferiores aos definidos em norma. Sendo assim, a cinza pesada proveniente da combustão do *Pinus Taeda* não pode ser utilizada como substituição do cimento Portland. Recomenda-se a realização de pesquisas com a utilização de cinza leve da combustão do *Pinus Taeda*, e, também, a caracterização química das cinzas.

REFERÊNCIAS

1. FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção: cinzas e aglomerantes alternativos**. Campinas: UNICAMP, 2003.

2. RODRIGUES, M. S.; BERALDO, A. L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Engenharia Agrícola**, [S.L], v. 30, n. 2, p. 193-204, 2010.

3. PAULA, M.O. de et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

4. DINIZ, H. A.et al. Caracterização e avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento. **HOLOS**, [S.L], v. 5, p. 51-64, 2018.

5. KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente.Rio de Janeiro:ABNT, 2009.

9. MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. Versão corrigida: 2015.



CAPÍTULO 32

ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO AGREGADO GRAÚDO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081132

REUPS; JOSÉ EDUARDO ANGELI[1]; NIEMCZEWSKI; JULIANA ALVES LIMA SENISSE[1]
[1]UNIVERSIDADE FEEVALE.
EDUARDOREUPS@HOTMAIL.COM

RESUMO: O estudo objetiva analisar a viabilidade da utilização do resíduo de construção e demolição gerado pelo laboratório de técnicas construtivas (Labtec) da Universidade Feevale, como substituto ao agregado graúdo para produção de blocos intertravados de concreto. Após beneficiamento e caracterização conforme NBR 7211 (ABNT, 2009), foram realizados traços experimentais com substituição nos teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, secos e umedecidos. Ensaios laboratoriais de inspeção visual, avaliação dimensional, resistência à compressão e absorção de água foram realizados. Concluiu-se que a substituição no teor de 40%, na condição seca, foi a mais adequada no sentido de atender aos requisitos da NBR 9781 (ABNT, 2013).

PALAVRAS-CHAVES: Construção civil; Concreto; *Pavers*; Resíduo; Reciclagem.

ABSTRACT: The study aims to analyze the feasibility of using construction and demolition waste generated by the Construction Techniques Laboratory at Feevale University, as a substitute for coarse aggregate to produce interlocking concrete blocks. After processing and characterization according to NBR 7211 (ABNT, 2009), experimental mixes were carried out with replacement in the contents of 10%, 20%, 30%, 40% and 50%, dry and moist. Laboratory tests for visual inspection, dimensional evaluation, compressive strength and water absorption were performed. It was concluded that the replacement of 40% content, in the dry condition, was the most adequate in order to meet the requirements of NBR 9781 (ABNT, 2013).

KEYWORDS: Construction; Concrete; Pavers; Residue; Recycling.

1 | INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável pelo consumo de 40%-75% de toda a matéria-prima produzida no planeta; gasta-se até 8% a mais em material devido a perdas. Para cada ser humano, são produzidos 500Kg de entulho, o que equivale a 3,5 milhões de toneladas/ano. Esses dados fazem da construção civil a indústria mais poluente do planeta(1).

Além disso, entre 40% a 75% de toda extração é destinada ao setor, além desta ser a maior produtora de resíduos sólidos urbanos (RSU), gerando a parcela predominante da massa total(15). O potencial de reaproveitamento/reciclagem permeia 30% a 40% do volume total de RSU(11), já a estimativa é de que apenas 13% desses resíduos sejam reciclados(17). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

ou SNIS[18], o índice de reaproveitamento de resíduos em relação ao total de RSU, em 2012, foi de 1,91%. No mesmo ano, apenas 91% do lixo produzido foi coletado[10].

Conforme a NBR 9781[6], o concreto utilizado em blocos intertravados deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água, podendo empregar aditivos químicos e pigmentos. A NBR 15116[7], permite realizar a substituição parcial do agregado graúdo natural por reciclado para concretos. Neste sentido, o presente estudo foi realizado buscando analisar a influência da adição de diferentes teores de RCD, como agregado graúdo na composição de blocos intertravados de concreto, em substituição parcial ao agregado graúdo natural. Para tanto, serão avaliadas as propriedades visuais, geométricas, física e mecânica do referido componente de concreto.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP V ARI-RS, conforme NBR 16697[8]; a água utilizada é proveniente de poço artesiano localizado na Universidade Feevale, o aditivo químico foi do tipo redutor de água (plastificante); o agregado miúdo empregado foi uma areia média de origem natural, conforme NBR 7211[5]; o Agregado Graúdo Natural, ou AGN, foi uma brita 1, de origem basáltica, enquanto o Agregado Graúdo Reciclado, ou AGR, obtido a partir do beneficiamento de RCD, obtidos do LBTEC da Universidade Feevale, ambas com diâmetro máximo de 19mm.

O resíduo empregado para a produção do AGR foi composto por tijolos/blocos cerâmicos e argamassa. A britagem do AGR, em virtude de limitações laboratoriais, se deu de forma manual, onde foram empregadas ferramentas adequadas, a fim de se obter um agregado cuja distribuição granulométrica assemelhava-se com o AGN.

2.2 Produção dos concretos

Para a produção do concreto, foi utilizado um traço fixo adaptado[2], sendo esse de 1:1,44:2,00:0,40 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo:fator água/cimento); e quando necessário, aditivo redutor de água (plastificante). Os traços estudados tiveram substituição do AGN pelo AGR, em massa, em teores de 0% (referência), 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Os AGR's foram substituídos na condição seca e umedecida (saturada).

O processo de saturação do AGR ocorreu com a realização de molhamento do mesmo com água potável, pelo período de 10 minutos, com consequente secagem de sua superfície com pano, visando não ter água livre e assim, aumentar a quantidade da água de amassamento.

Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo inclinado, seguindo a ordem tradicional de mistura dos materiais, quando necessário empregado aditivo químico.

Finalizada a mistura, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme NBR NM 67[3], este fixado em 4 ± 1cm para todos os traços. Este ensaio foi realizado com o intuito de avaliar a qualidade dos concretos produzidos. Os resultados obtidos estão na Tabela 1.

Dim.	Traços										
	PSEC-REF	PSEC-10%	PSEC-20%	PSEC-30%	PSEC-40%	PSEC-50%	PSAT-10%	PSAT-20%	PSAT-30%	PSAT-40%	PSAT-50%
Abatim. (mm)	4,00	3,50	3,50	3,00	2,50	2,00	4,00	4,00	5,00	6,00	5,00
Aditivo (%)	0,00	0,40	0,85	1,20	1,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00

Tabela 1: Abatimento dos diferentes traços de concreto

Os corpos de prova foram moldados com o procedimento de preenchimento em duas camadas com adensamento manual (25 golpes/camada), conforme adaptação da NBR 5738[4]. Após o adensamento manual, realizou-se adensamento mecânico (1 min), em agitador de peneiras. Para cada um dos traços estudados foram produzidos 9 corpos de prova.

2.3 Métodos de ensaio

Para análise visual e dimensional empregaram-se 6 corpos de provas/traços. Na análise dimensional, as medidas máximas adotadas foram de 250mm (comprimento), mínima de 97mm (largura) e de 60mm (altura). Antes do ensaio de resistência à compressão, este realizado aos 35 dias completos de cura, os blocos intertravados foram capeados (pasta). Realizou-se a imersão em água (23 ± 5°C) com 24h de antecedência ao ensaio, conforme preconiza NBR 9781[6]. Para o ensaio de absorção de água, realizado aos 28 dias completos de cura, 3 blocos/traços foram imersos e mantidos em água (23 ± 5°C), por cerca de 24h. A secagem foi realizada em estufa (110 ± 5°C), durante 24h, até obtenção de constância de massa.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram analisados conforme NBR 9781[6]. Para os resultados de resistência à compressão e de absorção de água foi realizada análise estatística de variância (ANOVA), através do uso do software Statistica 7.0, com um nível de confiança de 95%.

3.1 Ensaio de inspeção visual

A utilização de formas padronizadas proporcionou a produção de blocos com faces em 90° e arestas vivas (Figura 2), tal qual solicita a norma. O uso de resíduo cerâmico (coloração vermelha), gerou variação na coloração dos blocos, aceita pela norma (Figura 3).



Figura 2 – Ângulos, arestas e rebarbas dos blocos



Figura 3 – Variação na coloração dos blocos

Fonte: Autor (2019)

Os resultados individuais e médios obtidos na avaliação das propriedades geométricas são semelhantes e satisfatórios, conforme demonstra Tabela 2.

Dim.	Traços										
	PSEC-REF	PSEC-10%	PSEC-20%	PSEC-30%	PSEC-40%	PSEC-50%	PSAT-10%	PSAT-20%	PSAT-30%	PSAT-40%	PSAT-50%
L (mm)	198,2	197,65	198,13	197,57	197,88	197,77	199,06	198,42	197,82	197,73	197,63
b (mm)	99,37	99,61	99,77	99,86	99,88	99,56	99,55	99,53	99,76	100,36	100,08
h (mm)	79,14	79,38	81,76	80,03	80,39	80,33	79,98	79,15	79,81	79,98	79,42

Tabela 2: Valores médios das dimensões dos blocos

3.2 Ensaio de resistência à compressão

Na Tabela 3 são expressos os resultados de resistência à compressão individual obtidos para cada um dos blocos intertravados.

Traço	Resistência individual das peças						fp	S	fpk, est
	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	Bloco 5	Bloco 6			
	fpi (MPa)	fpi (MPa)	fpi (MPa)	fpi (MPa)	fpi (MPa)	fpi (MPa)			
P-sec-ref	41,00	46,10	39,60	40,70	32,70	33,70	38,97	5,01	34,36
P-sec-10%	47,20	45,80	44,70	52,10	45,60	54,80	48,37	4,11	44,59
P-sec-20%	45,10	45,20	42,80	41,00	46,80	39,90	43,47	2,68	41,00
P-sec-30%	41,70	35,50	41,60	37,40	38,40	48,60	40,53	4,63	36,27
P-sec-40%	34,40	40,60	40,80	35,60	38,80	38,50	38,12	2,61	35,71
P-sec-50%	32,40	24,90	30,50	34,30	28,00	25,80	29,32	3,72	25,89
P-sat-10%	44,70	42,40	41,90	42,60	45,10	41,30	43,00	1,54	41,58

P-sat-20%	43,90	45,00	46,90	46,10	43,30	37,50	43,78	3,36	40,70
P-sat-30%	39,90	35,20	43,10	43,40	42,50	37,20	40,22	3,41	37,08
P-sat-40%	38,40	27,80	40,40	36,60	37,20	38,70	36,52	4,47	32,41
P-sat-50%	36,00	31,30	36,30	33,60	36,90	31,70	34,30	2,45	32,05

Tabela 3: Resistência característica à compressão estimada dos blocos

Com a análise dos resultados é possível observar que para o concreto referência, os resultados obtidos de resistência à compressão foram inferiores aos traços com substituições de 10% e 20%. Tal comportamento ratifica o indicado na bibliografia[13,9,12], a qual aponta que tais resíduos podem agir como pozolanas artificiais, favorecendo o aumento da resistência à compressão dos concretos.

Com a realização da análise de variância (ANOVA) foi possível observar que somente o teor de substituição gerou efeito significativo nos resultados obtidos, Tabela 4.

Variáveis	F	GDL	p	S
Saturação	3,30	2	0,042	NS
Teor de subst. (%)	11,47	10	0,000	S
Sat.*Teor de subst. (%)	--	--	--	--

Onde: F – valor calculado; GDL – graus de liberdade; p – nível de significância; S - significativo; NS –não significativo
OBS.: Por alguma inconformidade com o programa, a resultante de Saturação*Teor de substituição (%) não ficou explicitada.

Tabela 4: ANOVA – Resistência à compressão

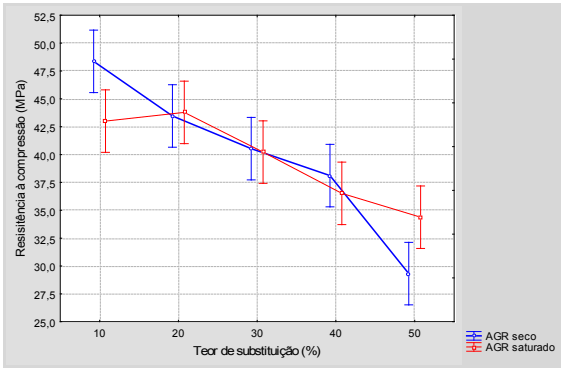


Gráfico 1: Teor de substituição x condição do agregado

Fonte: Autor (2019)

A saturação do AGR não apresentou influência significativa nos resultados analisados. No Gráfico 1 é apresentada uma análise de 2ª ordem entre o teor de substituição e a condição do agregado. Conjuntamente, analisando o Gráfico 1, é possível concluir que os concretos com teores de substituição de até 40% atenderam aos requisitos de norma com relação a propriedade avaliada. Tal comportamento também foi observado na literatura[16,14]. Somente os traços com substituição de 50% não atenderam a resistência à compressão mínima de 35 MPa.

3.3 Absorção de água

Os resultados, individuais e médios, obtidos no ensaio de absorção de água

mostraram-se satisfatórios às solicitações da norma brasileira[7], conforme demonstrado na Tabela 5.

Abs. (%)	Traços										
	PSEC-REF	PSEC-10%	PSEC-20%	PSEC-30%	PSEC-40%	PSEC-50%	PSAT-10%	PSAT-20%	PSAT-30%	PSAT-40%	PSAT-50%
1	1,78	2,01	1,85	1,88	2,35	2,14	2,73	2,40	1,99	2,69	2,88
2	2,07	1,43	1,93	2,17	2,58	2,59	1,88	2,35	2,44	2,90	2,63
3	1,89	1,70	2,24	2,33	1,89	3,46	1,83	2,70	2,61	3,03	2,88
Média	1,91	1,72	2,01	2,13	2,27	2,73	2,15	2,48	2,35	2,88	2,80

Tabela 5: Absorção individual e média dos blocos

Realizando a análise estatística, observa-se que para esta variável de resposta, a condição do agregado e o teor de substituição apresentaram influência significativa (Tabela 6).

No Gráfico 2 é apresentada uma análise de 2ª ordem entre as duas variáveis, pode-se observar que independente da condição de saturação do agregado (seco ou saturado), o aumento do teor de substituição do AGN pelo AGR gerou um aumento na taxa de absorção de água.

Variáveis	F	GDL	p	S
Saturação	1544	2	0,00	S
Teor de subst. (%)	120	5	0,00	S
Sat.* Teor de subst. (%)	1	10	0,687	NS

Onde: F – valor calculado de F; GDL – graus de liberdade; p – nível de significância; S - significativo; NS – não significativo

Tabela 6: ANOVA – Teor de absorção de água

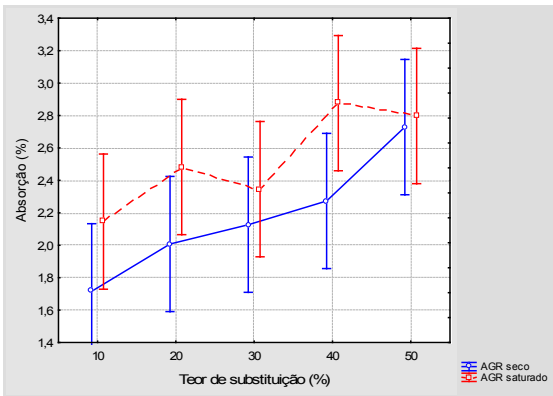


Gráfico 2: Teores de absorção médios obtidos pelas diferentes saturações do agregado

Fonte: Autor (2019)

Tal comportamento era esperado, uma vez que o AGR tem uma taxa de absorção de água três vezes maior que o AGN, assim causando uma maior absorção de água no bloco intertravado avaliado.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, é possível concluir que a utilização do agregado reciclado em substituição ao agregado natural, influencia nas características do bloco intertravado de concreto. O umedecimento do agregado não proporcionou aumento considerável de resistência à compressão, apenas favoreceu a consistência do concreto, facilitando o amassamento e a moldagem.

Para trabalhos futuros, sabido que o umedecimento do agregado reciclado não apresentou grande significância no resultado, sugere-se a adoção da saturação do produto por completo, sendo mantida por determinado período imerso na água e somente depois do tempo previsto, disposto sob a peneira para escoamento da água. Além do exposto, sugere-se a substituição da utilização de aditivo plastificante por super plastificante de concreto, a fim de que se atinja o abatimento mínimo previsto e o processo de moldagem seja facilitado.

REFERÊNCIAS

1. AGOPYAN, V.; **Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta**. Disponível em <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>. Acesso em: 07 nov. 2019.

2. ARAÚJO, D. de L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M**.; Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC. v.11 n.01. Goiânia/GO, 2015.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2003.

4. _____. NBR 5738. **Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de janeiro, 2015.

5. _____. NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de janeiro, 2009.

6. _____. NBR 9781 - **Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

7. _____. 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.

8. _____. NBR 16997. **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de janeiro, 2018.

9. COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão.** vol1. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 610p. 1997.

10. GRISA, D. C.; CAPANEMA, L. X. de L. **Resíduos sólidos** = Municipal solid waste. In: PUGA, F. P.; CASTRO, L. B.(Org.). Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta. Rio de Janeiro : BNDES, 2018. p. 415-438.

11. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos de Logística Reversa Obrigatória.** Brasília, 2012. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/ agencia/ images/stories/ PDFs/relatoriopesquisa/120807_ relatorio_residuos_solidos_reversa.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2019.

12. LEITE, M. B.; DAL MOLIN, D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D.** Sitientibus, Feira de Santana/BA, n.26, p.111-130, jan./ jun. 2002.

13. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades, Materiais**. São Paulo, 1994.

14. MIZUMOTO, C.; SIMIELI, D.; SALLES, F.M. **Uilização de Agregados Reciclados em Pavimentos Intertravados.** Revista Exacta, São Paulo, v.5, n.2, p.231-241, jul-dez. 2007.

15. PASCHOALIN FILHO, J. A.; DUARTE, E. B. L. **Caracterização e destinação dos resíduos de construção gerados a construção de um edifício comercial localizado na cidade de São Paulo**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v.3, n.2, p.223-246, 2015.

16. POON. C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. (2002) **Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks**. Constuction and Building Materials, vol. 16, p. 281-289.

17. SILVA, S. P. **A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da economia solidária.**. Rio de Janeiro: Ipea, jan. 2017. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_ content&view=article&id=29271>. Acesso em: 26 fev. 2019.

18. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **O Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos divulga anualmente a base de dados do Snis, em seu componente "resíduos sólidos".** Disponível em <http://www.snis.gov.br/ diagnostico-residuos-solidos/ diagnostico-rs-2016>. Aceso em: 04 mar. 2019.



AVALIAÇÃO DO USO DO PÓ DE RETIFICA PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081133

AVERNA; LARISSA BERTHO[1]; MATTEDI; CAROLINA VIEIRA[1]; DE ABREU; VICTOR BARRETO[1]; CONTINI; PAULO VICTO MATIELLO[1]; MARIANI; BRUNA BUENO[1]
[1]CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: BRUNABMARIANI@GMAIL.COM

RESUMO: Em virtude do grande consumo de matérias-primas não renováveis para a construção de estradas, tornou-se perceptível a necessidade da utilização de resíduos em camadas de pavimentação. Desta maneira, este trabalho tem como objetivo analisar a aplicabilidade da incorporação do resíduo pó de retífica em camadas de pavimentação. Por meio de ensaios laboratoriais, foi verificado o comportamento do pó de retífica incorporado a um solo de empréstimo. A partir das análises descritas neste artigo, pode-se perceber que o solo estabilizado com a incorporação de 10% do resíduo apresentou características mínimas aceitáveis para aplicação em reforço de subleito e subleito.

PALAVRAS-CHAVES: Pavimentação, pó de retifica, sustentabilidade, resíduos s*ólido*s.

ABSTRACT: Due to the high consumption of non-renewable raw materials for road construction, the need to use waste in pavement layers became noticeable. In this way, this work has as goal to analyze the applicability of the incorporation of the grinding dust, of clutch discs, in layers of pavement. By means of laboratory tests, it was verified the behavior of the grinding dust incorporated in a loan soil. From the analyzes described in this article, it is able to observe that the soil stabilized with the incorporation of 10% of the residue presented minimum acceptable characteristics for application in subgrade and subgrade reinforcement.

KEYWORDS: Pavement, grinding dust, sustainability, solid waste.

1 | INTRODUÇÃO

Os resíduos industriais cada vez mais estão tendo seu devido valor agregado, principalmente pelo setor da construção civil. Essa valoração se deve ao desenvolvimento de estudos para a inclusão dos materiais antigamente considerados afuncionais, promovendo ações sustentáveis. Isto porque, alguns resíduos apresentam potencial de aproveitamento como material de construção para concretos, argamassas e/ou estabilização de solos.

Além disso, por ser grande consumidora de recursos naturais, o setor da construção civil busca maneiras de mitigar esse prejuízo ambiental a partir do reuso de resíduos em suas atividades. A construção de pavimentação para estradas é um serviço que usufrui de grande quantidade de materiais provenientes de fontes naturais. Desta forma, com o intuito de reduzir o uso abusivo da matéria-prima não renovável e dar

uma destinação ambientalmente segura a um resíduo, o objetivo do presente estudo foi analisar a viabilidade da utilização do pó de retifica em camadas de base e/ou sub-base, incorporado ao solo destinado a essas camadas, para pavimentação, empregando o princípio da estabilização química.

O principal componente para a estrutura da pavimentação é o solo, no entanto, os materiais encontrados em campo nem sempre atendem às exigências. Sendo assim, faz-se necessário a correção deste solo (BRITO; PARANHOS, 2017)[1]. A estabilização química, como uma forma de correção do solo, modifica a estrutura do solo por meio da relação química entre o estabilizador e os minerais presentes no solo para assim alcançar os requisitos de projeto (MAKUSA, 2013; MEDINA, 1987 *apud* BRITO; PARANHOS, 2017)[1].

O resíduo em destaque, pó de retifica, dentre tantos outros é proveniente das indústrias automobilísticas. Baseado na ZF Sachs a geração deste resíduo no Brasil em 2016 foi em torno de 40 toneladas/mês (MORELLI; RIBEIRO *et al*., 2019)[2]. Sua origem é decorrente do processo de acabamento por meio de lixas no disco de embreagem em que é composto por fibras metálicas, poliméricas e de vidro, além do envolvido em um banho de borracha com aditivos (RIBEIRO, 2006)[3].

Apesar do pó de retifica apresentar potencial de aproveitamento, recorrentemente tem como destinação a incineração, ocasionando em emissões de poluentes, desta forma não se enquadrando em práticas ambientalmente adequadas como a reutilização e/ou reciclagem (THOMPSON, J.; ANTHONY, H., 2008 apud MORELLI; RIBEIRO et al., 2019)[2].

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado para o desenvolvimento de um projeto de pavimentação no bairro de Stella Mares, Salvador - BA. A região faz parte do litoral da Bahia, e o bairro de Stella Mares fica ao lado da praia e do Parque das Dunas em Salvador. Por se tratar de uma região com solo predominantemente arenoso, foram realizados para o solo local (Figura 1.a), ensaios de determinação da composição granulométrica de agregado, segundo a norma ABNT NBR NM 248/2003[4] e de determinação da massa específica, segunda as normas DNER-ME 194/98[5] e ABNT NBR 16916:2021[6], os quais evidenciaram módulo de finura de 2,47% e massa específica de 2,60 g/cm³.

Os dados obtidos caracterizam um solo granular, comprovando a necessidade de utilização de material de empréstimo para a composição das camadas da pavimentação, visto que, as areias não apresentam adequada resistência mecânica no estado compactado. Isto ocorre porque os solos arenosos são muito permeáveis e apresentam comportamento drenante, assim, a compressibilidade nas areias ocorrerá rapidamente devido à alta permeabilidade, fazendo com que as areias sofram, então, uma deformação causada pela distorção das partículas e pelo movimento relativo de rolamento, e escorregamento entre as mesmas (CUNHA, 2012) [7].

O material utilizado como empréstimo (Figura 1.b) foi um solo disponível em jazida próxima à região de projeto. Este solo foi investigado por meio dos ensaios de caracterização apresentados na Tabela 1.



a)



b)

Figura 1: a) Solo arenoso; b) Solo de empréstimo

Fonte: Os autores.

Ensaio	Norma/Método
Determinação do Limite de Liquidez	ABNT NBR 6457/2016[8] e ABNT NBR 6459/2016[9]
Determinação do Limite de Plasticidade	ABNT NBR 6457/2016[8] e ABNT NBR 7180/2016[10]
Compactação do Solo	ABNT NBR 7182/2016[11]
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	ABNT NBR 9598/2016[12]
Compressão Diametral	ABNT NBR 7222/2011[13]

Tabela 1 - Ensaios para caracterização do solo de empréstimo.

Fonte: Os autores.

O resíduo dos discos de embreagem, ou pó de retífica, foi o material escolhido para aplicar nas bases e sub-bases da pavimentação com o objetivo de torná-la mais sustentável. Percebeu-se pelo manuseio do material que ele apresenta comportamento elástico. Por esta razão a mistura do solo de empréstimo com o pó de retifica não obteve consistência necessária para a realização dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Dito isto, os ensaios de LL e LP foram feitos apenas para o solo de empréstimo puro.

Foram analisadas amostras do solo de empréstimo puro e da mistura do solo com resíduo, a partir dos ensaios de Índice Suporte Califórnia e Tração por Compressão Diametral. A Figura 2 apresenta o aspecto do resíduo pó de retífica e da mistura solo-resíduo.



a)



b)

Figura 2: a) Resíduo Pó de retífica; b) Mistura solo-resíduo

Fonte: Os autores.

A partir dos resultados do ensaio de compactação foi possível determinar uma umidade ótima para o ensaio, entretanto a presença do resíduo de pó de retífica afetou o comportamento da mistura e homogeneização para o processo de compactação. A mistura com o resíduo foi iniciada com 16% de umidade e adicionado água até 20% com intervalos de 2%. Com umidades superiores não foi possível obter trabalhabilidade para a realização do ensaio.

Para o ensaio de compressão diametral, foram moldados três corpos de prova cilíndricos (CP), de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada dosagem, sendo com 0% e 10% de pó de retífica), compactados em três camadas iguais. Os corpos de prova foram submetidos à cura até a idade de 7 dias, para então serem submetidos ao rompimento por compressão diametral.

3 | RESULTADOS

Os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) apresentaram como resultado os valores descritos na Tabela 2 abaixo. A tabela também apresenta o índice de plasticidade, que representa a diferença dos valores entre LL e LP.

Resultados dos Ensaios	
Limite de Liquidez (%)	61,90
Limite de Plasticidade (%)	30,48
Índice de Plasticidade (%)	31,42

Tabela 2: Resultados sobre limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade

Fonte: Os autores.

A partir dos ensaios de LL e LP podemos classificar o solo como argiloso de média plasticidade. Já o ensaio de compactação do solo obteve como umidade ótima o valor de 20,7%.

A Tabela 3 apresenta os resultados de expansibilidade e resistência Índice Suporte Califórnia (ISC), para o solo puro e para o solo misturado com 10% de resíduo.

Teor de resíduo incorporado ao solo	Expansibilidade (%)	ISC (%)
0%	3,27	12,37
10%	2,93	3,00

Tabela 3: Resultados do ensaio de ISC.

Fonte: Os autores.

Nota-se na Tabela 3, que há uma redução significativa da resistência Índice Suporte Califórnia do solo com inserção de 10% de resíduo. Isso se deve, provavelmente, há porosidade da mistura solo-resíduo no estado compactado, devido a maior granulometria do resíduo (AKBARIMEHR, ESLAMI, AFLAKI, 2020) [14].

A resistência ISC apresentada pelo solo-resíduo, indica que a mistura não poderá ser aplicada em camadas de base e sub-base, que exigem resistências mínimas de 80% e 20% segundo o Manual do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) [15], respectivamente. Contudo, seu uso pode ser recomendado para aplicações em reforço de subleito e/ou subleito, por serem camadas que requerem resistência ISC menores (2%) [15].

Os resultados de resistência à compressão diametral para o solo puro e para solo homogeneizado com 10% de resíduo, são apresentados na Tabela 4. É possível observar que o solo sem incorporação de resíduo apresentou resistência à compressão diametral duas vezes maior que a mistura solo-resíduo, evidenciando novamente a redução de resistência do solo com a inserção do resíduo.

Teor de resíduo incorporado ao solo	Resistência à Compressão Diametral (MPa)
0%	45,12 ± 3,56
10%	14,12 ± 2,60

Tabela 4. Resistência à compressão diametral dos corpos de prova de solo puro e mistura solo-resíduo.

Fonte: Os autores.

O dimensionamento das camadas da rodovia foi realizado a partir do método informado pelo DNIT, que visa proteger o subleito do solo contra a geração de

deformações plásticas excessivas durante o período de uso da rodovia. Para o dimensionamento das camadas é necessário encontrar o número N, o qual é calculado de acordo com a norma. Os valores de tráfego e dimensões da rodovia necessários ao cálculo, foram obtidos através de valores médios das rodovias existentes na cidade de Salvador e podem ser observadas na Tabela 5.

Dados da rodovia	
Tipo de Pavimento	Semi-flexivel
Fluxo em média (*Vm*)	1000 Veículos / dia
Quantidade de vias	Mão dupla (2)
Veículos de 2 Eixos	70 %
Veículos de 3 Eixos	24 %
Veículos de 4 Eixos	6 %
Período de Projeto (P)	10 anos

Tabela 5: Classificação e Informações da Rodovia

Fonte: Própria.

De acordo com a tabela de revestimento asfáltico do manual de pavimentação do DNIT de 2006[15], o valor da espessura da camada de revestimento, além do material, pode ser determinado pelo valor do Número N, que foi calculado de $1{,}33 \times 10^7$. Adotando-se assim uma espessura de 100 mm de concreto asfáltico para o revestimento.

Com base nos dados fornecidos pelos ensaios foi possível identificar a altura de cada camada, sendo que a mistura de solo-resíduo pôde ser utilizada com o subleito. Com os valores de ISC e o número N obtido tornou-se viável dimensionar a altura útil de cada camada através do Manual de Pavimentação IPR 176 do DNIT de 2006[14]. Sendo compreendido que todo dimensionamento é realizado com base no substrato anterior de cima para baixo, e foi inicializada a partir da camada de revestimento asfáltico pois é a única conhecida. A Tabela 6 a seguir mostra os resultados das alturas de cada camada do projeto de pavimento.

Tipo de Solo	ISC (%)	Mistura	Função	Espessura (cm)
Brita Graduada	100,0	100% Brita	Base	15
Solo Brita	60,0	70% Solo / 30% Brita	Sub-Base	15
Solo Argiloso	12,5	100% Solo	Ref Subleito	35
Solo-resíduo	3,0	90% Solo / 10% pó de retífica	Subleito	---

Tabela 6: Tabela dos resultados do Dimensionamento

Fonte: Própria.

4 | CONCLUSÃO

Baseando-se em ensaios laboratoriais o presente estudo investigou propriedades geotécnicas de misturas de um solo argiloso e deste mesmo solo contendo resíduo de borracha. Diante dos resultados apresentados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- É possível preservar matérias-primas naturais substituindo-se parcialmente solos argilosos por misturas de solo com resíduo pó de retifica, para aplicação de reforço de subleito e/ou subleito, por serem camadas que requerem resistência ISC menores;
- As misturas solo-resíduo não apresentaram resistência ISC que validem seu uso em camadas de base e sub-base de pavimentações;
- As resistências à compressão diametral apresentam uma queda com a incorporação de 10% de pó de retífica;
- O dimensionamento de pavimentação apresentado demonstrou a viabilidade do uso da mistura solo-resíduo como subleito, apresentando um pavimento com espessura total de 75 cm.

Apesar dos resultados de resistências para as misturas solo-resíduo inviabilizarem seu uso em camadas de base e/ou sub-base, é importante ressaltar que outras dosagens não foram testadas, não sendo possível prever o comportamento da mistura com o aumento ou decréscimo de resíduo. Desta forma, ensaios complementares devem ser realizados para confirmar sua limitação.

REFERÊNCIAS

1. BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.** Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438. Setembro de 2017. ISSN:2448-0959.

2. MORELLI; RIBEIRO *et al*. Efeito retardador do pó de retífica e sua influência nas propriedades físico-mecânicas e reológicas das matrizes cimentícias. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 12, n. 3, p. 498-500, 2019.

3. RIBEIRO, D.V. **Influência da adição de pó de retífica em uma matriz de cimento de fosfato de magnésio.** Dissertação de Mestrado, São Carlos; UFSCar, 2006.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248/2003:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

5. DNER-ME 194/98 - Determinação da massa específica de agregados por meio do frasco Chapman.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916/2021**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

7. CUNHA, C. L. S. **Estudo das características de compressibilidade unidimensional e plasticidade de misturas de argila e areia.** Dissertação de Mestrado, Vitória-ES. UFES, 2012.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457/2016**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459/2016**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180/2016**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182/2020**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9598/2016:** Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222/2011: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

14. AKBARIMEHR; ESLAMI; AFLAKI. Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste. **Journal of Cleaner Production**, Volume 271, 20 October, 2020.

15. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação – IPR 719, 3. Ed**, 2006, Rio de Janeiro.

CRIAÇÃO DE REVESTIMENTOS BIOINSPIRADOS A PARTIR DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081134

MENEGUEL, CAROLINA FROTA[1]; DAPPER, SILVIA TREIN HEIMFARTH
[1]UNIVATES; [2]UNIVATES.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: CAROLINA.FROTAMENEGHEL@GMAIL.COM

RESUMO: Este estudo consistiu em desenvolver novo material utilizando resíduos de argamassa e concreto descartados na construção, para aplicação em revestimentos decorativos. Para isso, foi realizada visita à uma obra para coleta dos resíduos que, foram classificados, moídos e submetidos aos ensaios de caracterização. Posteriormente, foram moldados corpos-de-prova com três traços de argamassa, compostas por diferentes proporções de resíduo e areia. Os mesmos foram caracterizados quanto à resistência a compressão e tração na flexão. Para criação, aplicou-se conhecimentos da biônica mediante análise de dois gêneros de orquídeas. Concluiu-se que a utilização dos resíduos como material para revestimentos é uma solução tangível.

PALAVRAS-CHAVES: Reaproveitamento de resíduos da construção civil; Argamassa e concreto; Biônica; Revestimento bioinspirado; *Design*.

ABSTRACT: This study consisted of developing a new material using mortar and concrete residues discarded in construction, for application in decorative coatings. For this, a visit was made to a construction site to collect the residues, which were classified, ground and submitted to characterization tests. Subsequently, specimens were molded with three mortar lines, composed of different proportions of waste and sand. They were characterized as to the resistance to compression and traction in flexion. For creation, knowledge of bionics was applied through the analysis of two genera of orchids. It was concluded that the use of waste as a material for coatings is a tangible solution.

KEYWORDS: Reuse of civil construction waste; Mortar and concrete; Bionics; Bioinspired coating; *Design*.

1 | INTRODUÇÃO

A área da construção civil é responsável por gerar impactos ao meio ambiente e também, por ser grande produtora de resíduos, os quais são originados durante todo o processo, desde a fabricação da matéria-prima até o momento final das obras. Conforme dados da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON (acesso em 2018), o Brasil desperdiça cerca de 8 milhões de reais por ano, devido ao fato de não reciclar os materiais de maneira adequada.

Em vista disso, o reaproveitamento destes resíduos seria fundamental, ambientalmente, pois teriam aplicabilidade para o desenvolvimento de um novo produto, diminuindo desta forma a quantidade de resíduos no meio ambiente.

Considera-se também a importância social do reaproveitamento, visto que, reduziria a poluição visual e enchentes causadas pelo descarte incorreto e falta de aterros. Assim como, economicamente, pois diminuiria custos durante as obras. Ademais, os revestimentos cimentícios estão sendo cada vez mais empregados, possuindo muitas vantagens, podendo ser utilizados em diversas áreas, tanto externas, quanto internas, devido suas propriedades de alta durabilidade. Além disso, estes revestimentos não necessitam de grandes manutenções.

Atualmente, a preocupação com medidas sustentáveis, com o modo em que os seres humanos estão cuidando do planeta e o consumo sustentável, são questões em evidência. Os revestimentos cimentícios representam um exemplo deste consumo consciente, que visa a sustentabilidade, detendo de um processo artesanal sem gerar poluição. Ainda, em seu desenvolvimento podem ser utilizados resíduos, diminuindo o número dos mesmos que são lançados na natureza.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste estudo, foi desenvolvido um programa experimental dividido em quatro etapas. A primeira envolvendo a coleta e determinação dos resíduos. A segunda, a moldagem de corpos de prova, com três traços diferentes. Em sequência, ensaios de caracterização dos corpos de prova. E, a quarta e última etapa, envolveu a metodologia fundamentada na biônica para a etapa criativa e suas fases projetuais. Na primeira etapa do programa experimental foi realizada visita a uma obra na cidade de Guaporé (Rio Grande do Sul), situada na Rua Talles Fillipon, no Residencial Reserva do Bosque.

Os resíduos foram coletados, classificados e pesados. Durante este processo, diversos resíduos e entulhos foram encontrados, como madeiras, restos de tubos e canos, cerâmicas, metais, caixas de papelão, tijolos, entre outros. No entanto, os resíduos encontrados e selecionados em maior quantidade foram os de argamassa e concreto, os quais foram recolhidos e pesados, totalizando 48 kg.

Inicialmente, os resíduos coletados passaram pelo processo de moagem por meio de um Britador da marca Dalpan e em seguida, foram peneirados separando, com o auxílio de uma peneira de abertura de 1,18 mm, os grãos de espessura mais fina dos grãos de espessura mais grossa. A parcela de resíduo com espessura mais fina, foi separada e utilizada para os traços, totalizando 15 kg. Em seguida, foram testados três diferentes traços para argamassa para verificar qual apresentaria as melhores características e propriedades mecânicas.

As misturas foram compostas de cimento CP IV - 32, cal hidratada, agregado miúdo fino e água. O primeiro traço foi definido em 1:1:4, na qual a proporção dos materiais corresponde em sequência as quantias de cimento, cal hidratada e areia, sendo definido como mistura base. O segundo traço, também em 1:1:4, composto de cimento, cal hidratada e com substituição da areia por resíduos, em 50%. E por fim, o terceiro traço, 1:1:4 formado em sequência pelas quantias de cimento, cal hidratada e com a substituição da areia por resíduos em 100% .

Depois, as misturas foram submetidas ao ensaio para a determinação do índice de consistência, caracterizado pela NBR 13276 (2016), com o auxílio de uma mesa

de adensamento por queda. Em sequência, as misturas foram moldadas em formas contendo três corpos de prova por forma, sendo estes de tamanho 160x40x40mm. Após moldadas, as formas passaram pela mesa de adensamento e logo depois de trinta quedas, os corpos de prova foram guardados e desmoldados após 48 horas, conforme a NBR 7215 (1997).

Após 28 dias de cura, foram realizados ensaios de caracterização de argamassa. Inicialmente todas as amostras passaram por ensaio de tração na flexão de acordo com a NBR 13279 (2005). Em seguida, teste de resistência à compressão conforme a NBR 13279 (2005). Além disso, executaram-se os ensaios de granulometria e de massa específica com a areia e o resíduo que foram utilizados nas misturas. O ensaio de granulometria foi realizado segundo a NBR NM 248, sendo feito em três etapas, primeiramente com a areia (mistura base), em seguida com areia e resíduo (mistura 50%) e, por fim, somente com resíduo (mistura 100%). Todos os ensaios ocorreram com a massa inicial de 500g e para os mesmos utilizou-se em sequência as peneiras com abertura de 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm, 150 µm e um fundo.

Em seguida, realizou-se também, o ensaio de massa específica, determinado pela NBR 9776. Assim como, o ensaio de granulometria, o mesmo ocorreu em três fases, primeiramente com a areia (mistura base), em seguida com areia e resíduo (mistura 50%) e, por fim, com resíduo (mistura 100%). Todas as amostras com a massa inicial de 500g. Para este ensaio, utilizou-se um frasco de Chapman, o qual foi preenchido com água até a marca de 200 cm^3, após as amostras foram inseridas no frasco com o auxílio de um Becker e o mesmo foi agitado com o intuito de eliminar possíveis bolhas de ar que poderiam interferir na leitura final. Por fim, a leitura do nível atingido pela água indicando o volume total da união das amostras com a água, a massa específica de cada amostra foi calculada por meio da expressão

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \qquad \text{Equação 1}$$

Para o presente estudo e desenvolvimento dos revestimentos decorativos, foi escolhida a metodologia de Kindlein Junior & Guanabara (2005), a qual tem como ênfase a criação de produtos incorporando novas alternativas fundamentadas na biônica. Segundo Kindlein Junior & Guanabara (2005), a biônica é uma ciência que analisa e estuda os princípios, propriedades e procedimentos dos elementos e sistemas presentes na natureza, com o intuito de criar produtos inovadores. Esta metodologia é segmentada em etapas consecutivas que auxiliam e viabilizam uma composição lógica e sistemática para o desenvolvimento de produtos, isto é, seleção da amostra, coleta da amostra, preparação e observação da amostra e parametrização. A partir da definição da metodologia da etapa criativa, as fases foram seguidas visando a criação do produto final, incorporando novas alternativas fundamentadas no estudo e metodologia da biônica.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir do programa experimental desenvolvido no capítulo anterior, referente a materiais e métodos, com a visita a obra, os resíduos encontrados foram coletados,

classificados e pesados. Em sequência, foram moldados corpos de prova com três traços diferentes para a definição do material com as melhores propriedades para o produto final. Além disso, após 28 dias, realizaram-se ensaios de caracterização dos corpos de prova com o intuito de verificar resistência a tração e compressão, e também, os ensaios de granulometria e massa específica.

Também, em relação a etapa criativa a partir da metodologia fundamentada na biônica, as fases projetuais foram seguidas em sequência, com a seleção da amostra por meio de pesquisas, coleta da amostra na natureza, preparação e observação mediante desenhos e ferramentas criativas, e pôr fim a parametrização. Os resultados e escolhas estão apresentados e observados neste capítulo.

3.1 Classificação dos resíduos

Após a classificação e a moagem dos resíduos, foi realizado o ensaio de granulometria para determinar a distribuição dos tamanhos de grãos de cada uma das misturas, isto é, areia (mistura base), areia e resíduo (mistura 50%) e resíduo (mistura 100%), para a elaboração da curva granulométrica. Os resultados podem ser vizualizados nas curvas granulométricas na Figura 1 a seguir.

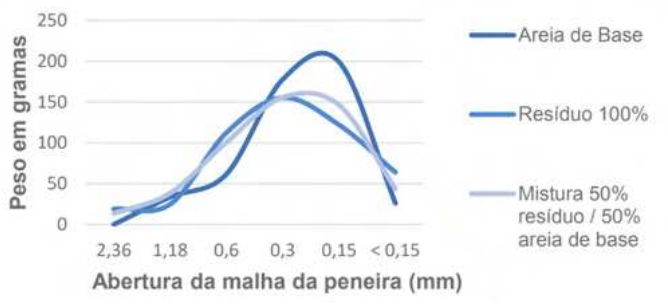


Figura 1 - curva granulométrica.

Fonte: elaborada pela autora (2019).

Ademais, assim como o ensaio de granulometria, também foi realizado o ensaio de massa específica com cada uma das misturas. Após este ensaio, com os resultados marcados no frasco de Chapman, foi realizado o cálculo para cada uma das misturas e obteve-se a massa específica da areia de base como 2,63 g/cm^3, da areia e resíduo como 2,5 g/cm^3 e, por fim, do resíduo como 2,57 g/cm^3.

3.2 Resultados ensaios de caracterização

Após 28 dias, os corpos de prova das argamassas foram submetidos aos ensaios de caracterização para verificar resistência a tração na flexão e compressão. Em relação a cor e textura, não notou-se grande diferença entre os corpos-de-prova. O ensaio destrutivo de tração na flexão foi realizado em consonância com a NBR 13279 (2005). Foram executados três ensaios, sendo repetido três vezes para cada uma das amostras. De acordo com os resultados, observou-se que o material com substituição de areia por

resíduo em 50% atingiu maior resistência à tração na flexão, desta forma suportando maiores forças do que as demais argamassas (Figura 2 e Figura 3).

Corpo de prova	Força máxima (N)	Resistência na flexão (Mpa)
M BASE	758.39	1.78
M 50	898.83	2.10
M 100	646.04	1.51

Figura 2 - Média relatório de ensaio de tração na flexão.

Fonte: elaborada pela autora (2021).

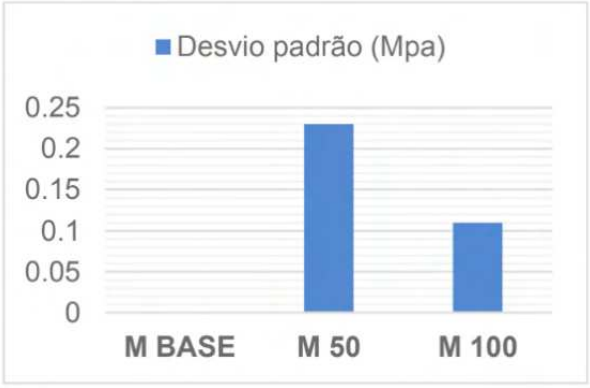


Figura 3 - Desvio padrão ensaio de tração na flexão.

Fonte: elaborada pela autora (2021).

Conforme os resultados obtidos a mistura base e a mistura 100% classificaram-se como R2, já a mistura 50% classificou-se como R3. Em relação aos materiais testados, cada um deles é distinto do outro, de acordo com análise estatística ANOVA com 95% de confiança (Valor-p < 0,05). Sucessivamente ao ensaio de tração na flexão, com parte dos corpos-de-prova rompidos, realizou-se o ensaio de compressão de acordo com a NBR 13279 (2005). Os resultados de média e desvio padrão deste ensaio, estão expostos nas Figuras 4 e 5. Conforme o ensaio realizado, constatou-se que as amostras com a mistura base atingiram melhor resistência à compressão, tendo o CP3 com a maior carga máxima de ruptura.

Corpo de prova	Força máxima (N)	Resistência na flexão (Mpa)
M BASE	13117.36	8.2
M 50	12387.06	7.74
M 100	11263.51	7.28

Figura 4 - Média relatório de ensaio de compressão.

Fonte: elaborada pela autora (2021).

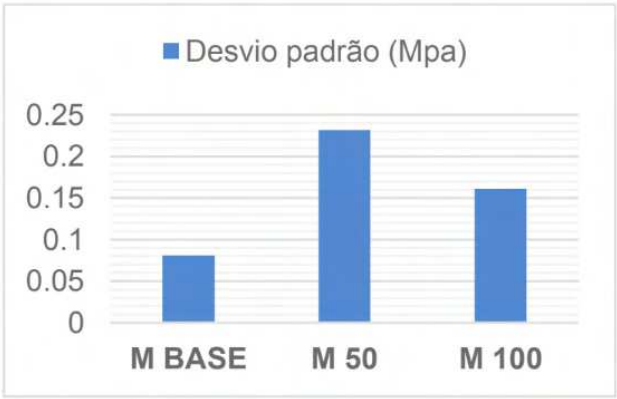


Figura 5 - Desvio padrão ensaio de compressão.

Fonte: elaborada pela autora (2021).

3.3 Resultados etapa criativa

Primeiramente foi realizada a seleção da amostra natural que serviu como fonte de inspiração. Por meio pesquisas bibliográficas e coleta de informações, foram escolhidos dois gêneros de orquídea: *Paphiopedilum e Zygopetalum*. Em seguida, ocorreu a visita ao Orquidário Bella Orquídea, onde as amostras foram recolhidas e, logo após, preparadas e observadas. Na terceira fase, as orquídeas foram separadas em partes para uma análise mais detalhada de cada uma. Posteriormente, foram realizados desenhos de observação e em sequência, os desenhos selecionados foram vetorizados por meio do *software*. No total foram desenvolvidas quatro vetorizações.

Logo depois, as alternativas vetorizadas foram repetidas formando padronagens. Em seguida, foram convertidas em peças 3D por meio de *software* e impressas em poliácido láctico - PLA. Depois, as peças impressas serviram de modelo para molde confeccionado em borracha de silicone azul PS. Os moldes de silicone ficaram prontos após 24 horas de cura. A partir dos moldes de silicone finalizados, a argamassa de traço 1:1:4, composto de cimento, cal hidratada e com substituição da areia por resíduos, em 50%, foi preparada e depositada nos moldes, sempre cobrindo a mais que o nível final, com o intuito de a mistura assentar de maneira homogênea ao serem dispostos na mesa vibratória de adensamento. Após 5 segundos na mesa de adensamento, os moldes foram nivelados na parte superior e o resultado final obteve-se após 24 horas

de cura da argamassa (Figura 6 e Figura 7).

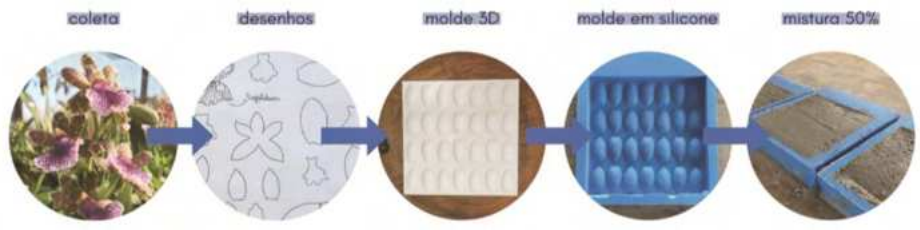


Figura 6 - Processo etapa criativa.

Fonte: elaborada pela autora (2021).



Figura 7 - Processo etapa criativa.

Fonte: elaborada pela autora (2021).

4 | CONCLUSÃO

Considera-se de grande importância projetar, analisando todas as fases de um produto, visando diminuir os impactos em todo seu ciclo, com processos ecologicamente eficientes, que não agridam o meio ambiente. Ademais, é fundamental que os resíduos tenham correta destinação, podendo ser reutilizados, reduzindo a extração de recursos naturais, diminuindo a poluição e, consequentemente, auxiliando na baixa de custos da obra. Em relação aos materiais analisados, conclui-se que a utilização dos resíduos como material para revestimentos decorativos é de grande importância e representa um destino ecologicamente responsável ao resíduo.

Os três materiais testados obtiveram bons resultados, no entanto, a mistura com substituição da areia por resíduos em 50% atingiu bons resultados em relação a resistência mecânica, aliada a possibilidade dar um novo destino às argamassas que haviam sido descartadas, sendo assim a melhor opção para o produto final. Além disso, para a continuação deste estudo são necessários ensaios de durabilidade para a verificação da capacidade dos mesmos, em desempenhar suas funções em ambientes externos e internos ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 2016.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 1997.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 2005.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776:** Informação e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro.

6. JUNIOR, W. K.; GUANABARA, A. S. **Methodology for product design based on the study of bionics.** Elsevier, Materials and Design 26 (2005) 149–155. Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/materials-and-design> Acesso em: 19 abr. 2019.

7. ABRECON. **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil**. Disponível em <https://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil/>. Acesso em 22 nov. 2018.



CONSTRUÇÃO DE QUIOSQUES COM TUBOS DE PAPELÃO EM EVENTOS TEMPORÁRIOS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081135

DIAS; NATHALIA SCHIMIDT[1]; SALADO; GERUSA DE CÁSSIA[2]
[1]UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS; [2]UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
E-MAIL: NATHALIA.SCHIMIDT@HOTMAIL.COM
E-MAIL: SALADO@UNICAMP.BR

RESUMO: Todos os anos ocorrem diversas feiras, exposições e eventos temporários no país. Nestes eventos utilizam-se quiosques com estruturas metálicas leves, contudo, pode-se utilizar outros materiais como, por exemplo, os tubos de papelão. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é propor a utilização de tubos de papelão para a construção de quiosques utilizados em feiras e exposições, tornando-se uma medida prática de conscientização para o público visitante. Metodologicamente fez-se o estudo do local para a implantação e o desenvolvimento do projeto dos quiosques através das ferramentas computacionais *AutoCAD* e *SketchUp*. Como resultado apresenta-se o projeto dos quiosques e pode-se concluir que os tubos de papelão utilizados em obras temporárias tornam-se uma medida prática de conscientização.

PALAVRAS-CHAVES: Tubos de papelão, materiais *não-convencionais*, eventos e feiras temporárias.

ABSTRACT: Every year there are several fairs, events and specific events in the country. In these events, kiosks with light metallic structures are used, however, other materials can be used, for example, cardboard tubes. Given the above, the objective of this work is to propose the use of cardboard tubes for the construction of kiosks used in fairs and functions, becoming a practical measure of awareness for the visiting public. Methodologically was made the study of the site for the implementation and development of the kiosks project through computational tools such as AutoCAD e SketchUp. As a result, the design of the kiosks is presented and it can be concluded that the cardboard tubes can be used in temporary works becoming a practical measure of awareness.

KEYWORDS: Cardboard tubes, non-conventional materials, temporary events and fairs.

1 | INTRODUÇÃO

Todos os anos ocorrem diversos eventos, exposições e feiras no Brasil e no mundo. Estes eventos precisam de planejamento e de infraestruturas que atendam ao público visitante, abordando desde a escolha do local até os tipos de quiosques utilizados. Os quiosques ou estandes são construções temporárias, que geralmente são compostas por estruturas metálicas leves e dependem do período de duração do evento, ou seja, tratam-se de construções com um curto ciclo de vida [(1)].

Como uma alternativa à substituição dos elementos metálicos que atualmente compõem os quiosques, pode-se utilizar tubos de papelão para propor construções

mais sustentáveis, uma vez que se utiliza um material reciclado e reciclável [2]. Além disso, os tubos de papelão são elementos baratos, não necessitam de grande tecnologia para a produção, são provenientes de materiais reciclados e apresentam características satisfatórias para atender aos esforços de compressão e tração [3] [4].

Os tubos de papelão utilizados na construção são formados por papel pardo ou *kraft,* normalmente, provenientes de processos de reciclagem. Para a produção dos tubos têm-se folhas de papel *kraft* banhadas em cola e enroladas em espiral em um cilindro. Com relação as colas utilizadas, para as camadas de revestimento interno e externo faz-se a aplicação de acetato de polivinila (PVA) a qual proporciona um bom acabamento, no entanto, para as camadas intermediárias dos tubos utiliza-se uma cola a base de silicato de sódio, a qual proporciona maior resistência a flexão e compressão diametral [5] [6].

O papel é um recurso abundante no Brasil e no mundo, podendo constituir obras de construção civil mais sustentáveis, uma vez que há redução nos resíduos sólidos gerados, diminuição do desperdício e a utilização de um material reutilizável e a reciclável [5], contudo para garantir maior resistência e durabilidade às construções, os tubos de papelão necessitam passar por um tratamento de forma a evitar a deterioração por umidade e intempéries [3].

Em um estudo realizado sobre os tubos de papelão empregados em obras de construção do arquiteto japonês Shigeru Ban, verificou-se que estes tubos podem ser utilizados para compor diversos sistemas construtivos como, vigas e pilares, tesouras e treliças planas, estruturas em arco entre outras [7]. Dessa forma, o material também pode ser utilizado para a concepção de quiosques utilizados em eventos temporários, uma vez que as estruturas são normalmente constituídas por vigas, pilares, tesouras e treliças planas.

Diante do exposto acima, o objetivo deste trabalho é propor a utilização de tubos de papelão para a construção de quiosques temporários utilizados em eventos, feiras ou exposições como uma solução mais sustentável e com menos impactos ao meio ambiente. No mais, este trabalho objetiva servir como medida prática para a conscientização ambiental do público visitante, bem como a quebra de paradigmas em relação ao uso de materiais não-convencionais aplicados em construções.

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende-se propor um projeto de extensão o qual será apresentado à Prefeitura Municipal de Limeira com o intuito de realizar a implantação destes quiosques em feiras que ocorram na cidade.

2 | METODOLOGIA

Fez-se o levantamento para averiguar os locais mais apropriados para a realização de eventos na cidade de Limeira – São Paulo. Após o levantamento dos principais locais, observou-se que boa parte dos eventos realizados na cidade ocorrem no Parque Cidade de Limeira, devido à localização e ao amplo espaço disponível. O local é utilizado para lazer da população, contudo tem-se toda a infraestrutura para a realização de *shows*, estacionamentos, vias de circulação etc., tornando-o uma escolha interessante para a realização de eventos.

Nas figuras 1 e 2 demonstra-se a vista aérea do local e um dos locais utilizados

para *shows* e eventos no Parque Cidade de Limeira.



Figura 1 – Vista aérea do Parque Cidade de Limeira

Fonte: Limeira, 2021 [8].



Figura 2 – Vista do Pavilhão do Parque Cidade de Limeira

Fonte: G1 Piracicaba e Região, 2020 [9].

Após o estudo do local e a visita *in loco* propõe-se que o evento ocorra próximo ao pavilhão principal, devido a extensão do local e para que seja aproveitada a infraestrutura disponível.

Para o projeto dos quiosques foram consideradas as dimensões dos elementos, bem como os espaçamentos entre estes, as peças de ligação, montagem e desmontagem etc. No mais, para o desenvolvimento do projeto foram utilizados programas computacionais como *AutoCAD* e *SketchUp* para elaborar e executar a renderização.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o desenvolvimento do projeto foram considerados alguns fatores iniciais como:

- **Escolha do local:** foi escolhido próximo ao pavilhão, devido a extensão do local e pensando-se no aproveitamento da infraestrutura existente. Em adição, também foi considerada a topografia do local, escolhendo-se um local bastante plano a fim de facilitar a instalação dos quiosques;
- **Formato dos quiosques:** após o estudo de algumas tipologias de quiosques já existentes, optou-se pelo desenvolvimento de um quiosque composto por elementos de papelão e cobertura com duas águas;
- **Dimensionamento dos elementos:** para o dimensionamento da estrutura foram considerados: diâmetros dos tubos e espessura de parede, forma de conexão entre os elementos, elementos de contraventamento, além do espaçamento máximo entre os montantes, evitando-se grandes vãos. No mais, pensou-se em elementos para a fixação no solo e também na aplicação de resinas para proteção dos tubos, garantindo a durabilidade dos elementos e possibilitando o reuso em outros eventos;

- **Cobertura dos quiosques:** para a cobertura dos quiosques serão utilizadas lonas plásticas que também poderão ser reutilizadas posteriormente em outros eventos.

3.1 Apresentação do projeto

Inicialmente faz-se necessário apresentar a planta baixa (figura 3). No desenho observa-se que o quiosque tem dimensões de 3,60 x 2,40 m, com espaçamento entre os montantes feitos em modulações de 0,60 m, sendo que o maior espaçamento atinge 1,80 m.

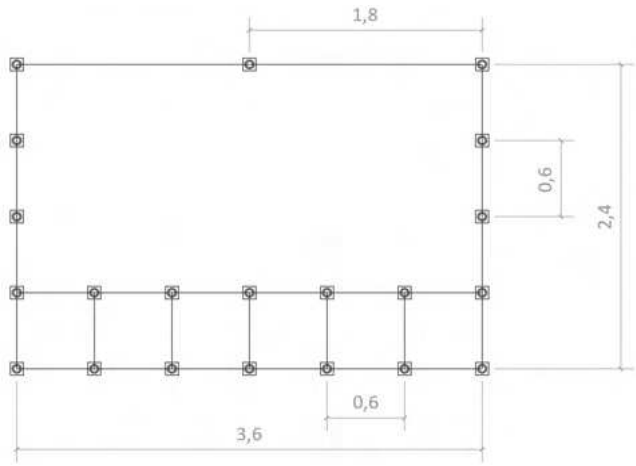


Figura 3 – Planta baixa do quiosque com as dimensões em metros.

Fonte: Autoria própria.

Na figura 4 demonstra-se o projeto tridimensional do quiosque. No ponto mais alto da estrutura, ou seja, na cumeeira, tem-se uma altura máxima de pé direito de 3,00 m e nas laterais do quiosque tem-se a altura de 2,30 m. Vale ressaltar que essas alturas já consideram as bases utilizadas para o encaixe e ancoramento dos tubos de papelão ao solo.

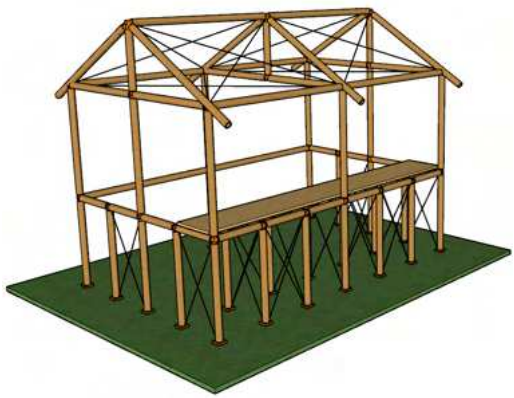


Figura 4 – Projeto tridimensional do quiosque

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 1 demonstram-se as dimensões e as quantidades dos elementos estruturais utilizados, sendo todos com o mesmo diâmetro interno e externo de forma a padronizar os elementos utilizados.

Elementos Estruturais – Tubos de Papelão	Quant.	Altura (m)	Comprimento (m)	Diâmetro interno (cm)	Diâmetro externo (cm)	Espessura (mm)
Tubos de papelão (verticais)	21	1,00	-	5	7	10
	8	1,20	-	5	7	10
	3	0,60	-	5	7	10
Tubos de papelão (horizontais)	25	-	0,53	5	7	10
	6	-	1,73	5	7	10
	4	-	1,13	5	7	10
Tubos de papelão treliça	6	-	1,65	5	7	10

Tabela 1 –Dimensões e quantidades dos tubos de papelão utilizados.

Fonte: Autoria própria.

Foram realizados ensaios em tubos de papelão com dimensões similares às adotadas neste projeto, sendo estes com diâmetro interno de 7,50 cm, espessura de 10 mm e 95 cm de altura. Após a realização dos ensaios, verificou-se que os valores para resistência à compressão axial simples alcançaram em média 1988,60 kgf. Dessa forma, por se tratar de uma estrutura de quiosque, considerada leve e sem grandes esforços solicitantes, a utilização de tubos de papelão pode ser considerada adequada, principalmente considerando-se os valores obtidos nos ensaios realizados com o material [10].

Nas figuras 5 e 6 apresenta-se o projeto completo renderizado e com a cobertura em lona plástica.

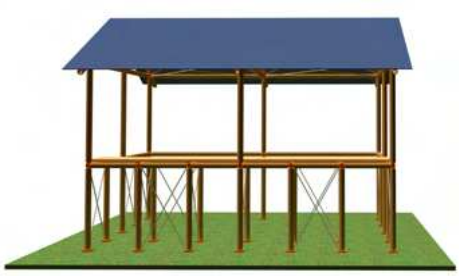


Figura 5 – Vista frontal do quiosque com tubos de papelão

Fonte: Autoria própria.



Figura 6 – Vista frontal do quiosque com tubos de papelão

Fonte: Autoria própria.

Para a conexão entre os tubos de papelão foram desenvolvidos alguns modelos de peças de ligação para cada situação, como extremidades, cantos, intermediárias etc. O encaixe dos tubos de papelão ao elemento de ligação é feito sob pressão, facilitando o processo de montagem e desmontagem da estrutura. Além da facilidade de conexão entre os elementos, as peças de ligação também possibilitam a colocação dos elementos de contraventamento, aumentando a estabilidade da estrutura.

Na figura 7 pode-se visualizar alguns dos exemplos das peças de ligação utilizadas, as quais serão confeccionadas em polímeros e através de impressão 3D.



Figura 7 – Peças de ligação utilizadas na construção do quiosque

Fonte: Autoria própria.

Além das peças de ligação para a conexão entre os elementos de papelão, também foram projetadas peças utilizadas nas bases para o encaixe dos tubos inferiores. Nestas peças de ligação pode-se colocar duas barras de aço presas, proporcionando a ancoragem ao solo. Este elemento serve como fundação superficial e também eleva os tubos de papelão a fim de evitar o contato direto com o solo e a absorção de umidade.

Na figura 8 demonstra-se a peça utilizada para a fundação e as barras de aço que fazem a ancoragem ao solo.



Figura 8 – Elemento de fundação com barras para ancoragem ao solo

Fonte: Autoria própria.

4 | CONCLUSÃO

Os tubos de papelão podem ser utilizados para a concepção de quiosques em eventos temporários como uma solução interessante devido a sustentabilidade ambiental, pois utiliza-se um material reciclado e reciclável, que pode ser reaproveitado se estiver em perfeitas condições, que não requer grandes consumos energéticos para a produção e reciclagem e, ainda, apresenta características satisfatórias para atender aos esforços solicitantes na estrutura.

A implantação dos quiosques em eventos públicos torna-se uma medida prática para conscientização ambiental do público visitante, bem como a quebra de paradigmas em relação ao material escolhido. Além disso, promove-se a disseminação do desenvolvimento das ideias estudadas na área acadêmica e demonstra-se que outros materiais diferentes dos convencionais (madeira, aço e concreto) podem compor obras de engenharia e arquitetura.

A elaboração e o desenvolvimento de peças de ligação que proporcionam o encaixe sob pressão dos tubos de papelão torna-se uma solução adequada à montagem e desmontagem da estrutura, permitindo também que esta seja reaproveitada em outros eventos.

Com relação a segurança e durabilidade da estrutura tem-se que levar em consideração fatores como montagem correta, colocação de elementos de contraventamento, cobrimento com lona plástica e, também, a elevação dos tubos de papelão em relação ao solo (elementos de fundação superficial), evitando-se a deterioração dos elementos inferiores devido ao contato com solo e absorção de umidade. Para aumentar a durabilidade, os tubos de papelão requerem o tratamento com aplicação de resina evitando a absorção de umidade, diminuindo os danos causados pela incidência dos raios ultravioletas e a proliferação de fungos e insetos.

Salienta-se que os tubos de papelão podem ser utilizados para compor estruturalmente os quiosques da mesma forma que as estruturas metálicas, mantendo

características como resistência e durabilidade satisfatórias. Destaca-se que para a estabilidade de qualquer estrutura faz-se necessário conhecer as propriedades e limitações do material e a durabilidade depende do tratamento correto dos elementos, uso e operação e das manutenções periódicas preventivas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil – (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. MARQUINE, E.; MACEDO, A. C. Arquitetura dos estandes imobiliários, um estudo de tipos. **Revista Projetar**. Projeto e Percepção do Ambiente, v.1, n.2, p.103-111, 2016.

2. CAMARGO, B. S.; SALADO, G. C. Sustentabilidade no uso de tubos de papelão aplicados na construção civil. Santa Catarina: Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS). **Anais do VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto**, 2019.

3. McQUAID, M. **Shigeru Ban.** Nova York: Phaidon Press, 2003.

4. CRIPPS, A. *Cardboard as a construction material: a case study.* ***Building Research & Information***, v. 32, n. 3, p. 207-219, maio 2004. Informa UK Limited.

5. ASSIS, J. R.; SALADO, G. C. Tubos de Papelão**.** Santa Catarina: Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS). **Anais do VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto**, 2019.

6. LACERDA, M. **A fabricação dos tubos de papelão.** Zelepel Indústria e Comércio de Artefatos de Papel S/A. Entrevista em 28 de jun 2006. 04p.

7. DIAS, N. S.; SALADO, G. C. . Construções com tubos de papelão: um estudo dos sistemas construtivos durante 2007-2017**.** Palhoça: Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS). **Anais do VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto**, V. 1. p. 105-116, 2020.

8. LIMEIRA. **Parque Cidade de Limeira.** Disponível em: https://www.limeira.sp.gov.br/sitenovo/service.php?servico=3&categoria=33&item=212#view_content_service Acesso em 01.jun.2021.

9. G1 Piracicaba e Região. **Coronavírus: decreto libera eventos culturais e abertura de áreas de lazer de Limeira**. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2020/09/07/coronavirus-decreto-libera-eventos-culturais-e-abertura-de-areas-de-lazer-de-limeira.ghtml Acesso em 01.jun.2021.

10. DIAS, N. S. ; SALADO, G. C. Study of axial compression resistance of cardboard tubes to elaboration an innovative structural system. México: **XVIII IC-NOCMAT**, 2017.

REUTILIZAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO EM ARGAMASSAS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081136

MARAN, ANA PAULA[1]; MENNA BARRETO, MARIA FERNANDA[2]; MASUERO, ANGELA BORGES[2]; DAL MOLIN, DENISE CARPENA COITINHO[2]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM), CAMPUS CACHOEIRA DO SUL; [2]PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E INFRAESTRUTURA (PPGCI), UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MFMENNABARRETO@GMAIL.COM

RESUMO: A areia de fundição é um resíduo sólido proveniente da indústria metalúrgica e é gerada a partir da etapa de desmoldagem de peças metálicas. O objetivo deste trabalho é avaliar a incorporação do resíduo dessa areia como agregado miúdo em argamassas. A substituição da areia natural pelo resíduo resultou em doze traços de argamassas. Foram realizados ensaios de consistência, densidade de massa aparente, absorção de água por capilaridade e resistência à compressão. Os ensaios mostraram que a areia de fundição pode ser utilizada como substituição parcial da areia natural, ponderando a influência do módulo de finura do resíduo nas propriedades finais da argamassa.

PALAVRAS-CHAVES: Areia de fundição; resíduos; argamassa.

ABSTRACT: Foundry sand is a solid residue from the metallurgical industry and is generated from the unmold stage of metal parts. The objective of this study is to evaluate the incorporation of this sand residue as a fine aggregate in mortars. The substitution of natural sand for the residue resulted in twelve mortar traces. Tests of consistency, mass density, water absorption by capillarity and compression resistance were carried out. The tests showed that the foundry sand can be used as a partial replacement of natural sand by considering the influence of the residue fineness modulus on the mortar final properties.

KEYWORDS: Foundry sand; residue; mortar.

1 | INTRODUÇÃO

A produção de fundidos de ferro no Brasil é cada ano mais crescente(1), estima-se que mais de 80% dos fundidos são fabricados pelo método que utiliza moldes de areia aglomerada(2), devido a versatilidade e economia. Porém, um dos principais aspectos ambientais dentro da indústria é a geração de resíduos sólidos provenientes deste processo de moldagem, resultando em, aproximadamente, 22% de resíduo de areia de fundição(3). O descarte da areia de fundição em aterros contribui para problemas ambientais(4), pois quando o material é exposto a intempéries, pode ocorrer a contaminação do solo e lençóis freáticos, devido à dissolução de resinas fenólicas, metais e não metais degradantes.

Há orientação para a indústria de fundição buscar alternativas para atender às exigências ambientais com relação a este tipo de resíduo, como aprimorar processos produtivos visando diminuir o volume de descarte, desenvolver processos de regeneração das areias usadas para reutilização no próprio processo de fundição, desenvolver novos ligantes e processos de moldagem como forma de reduzir a carga poluente, determinar o impacto ambiental das areias descartadas e, por fim, estudar formas alternativas para o uso deste resíduo[1].

Perante o alto volume de produção e rejeite de resíduos, é notória a preocupação com a reutilização da areia de fundição descartada para a aplicação na construção civil, como forma de amenizar o impacto ambiental. Além disso, esses resíduos são classificados, segunda a NBR 10004[5], como não perigosos, Classe II, apresentando potencial para outras aplicações. Esse resíduo pode ser aplicado em argamassas e concretos [6-8], blocos, pavimentos e pisos de concreto[9-11] e tijolos[12].

Dado o exposto, o presente trabalho buscou incorporar o resíduo areia de fundição na fabricação de argamassas tradicionais de revestimentos, através da substituição de diferentes proporções da areia natural pelo resíduo. Para isso, caracterizou-se os materiais constituintes e avaliou-se as principais características físicas e mecânicas das argamassas produzidas.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados cimento CP IV–32, areia natural do Guaíba (Porto Alegre/RS) e areia de moldagem de fundição proveniente da região noroeste do Rio Grande do Sul para a produção das argamassas.

A estrutura cristalina da areia de fundição foi constatada a partir de ensaios de Difração de Raio-X (DRX) em equipamento *Philips X'Pert MPD Tubo,* no qual fica evidente a insuficiente quantidade de parcela amorfa, bem como elevada cristalinidade do material (Figura 1), justificando seu uso como substituição do agregado.

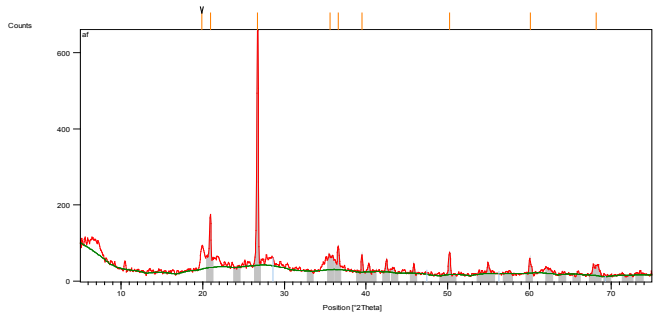


Figura 1 - Caracterização do resíduo de areia de fundição por Difração de raio-x

Fonte: Autores.

A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada de acordo com a NBR NM 248[13], obtendo-se módulo de finura de 2,32, dimensão máxima característica de 4,75mm e distribuição contínua para a areia natural, e 1,37 de módulo de finura, 600 µm de dimensão máxima e distribuição granulométrica uniforme para areia de fundição. A massa unitária dos materiais também foi ensaiada, através do Método C da NBR NM 45[14], encontrando-se 0,87kg/dm³ para o cimento, 1,35kg/dm³ para areia natural, e 1,28kg/dm³ para areia de fundição.

A produção das argamassas foi realizada a partir da definição de três traços em volume usualmente utilizados em obra (1:1,5, 1:3 e 1:4,5), nos quais substituiu-se a areia natural pela areia de fundição em diferentes proporções, como mostra a Tabela 1. Para a definição da relação água/cimento, fixou-se a consistência em 26±1 cm.

Para caracterização das argamassas e análise da substituição do resíduo de areia de fundição, foram realizados os ensaios de determinação do índice de consistência[15], densidade de massa aparente no estado endurecido[16], absorção de água por capilaridade[17] e resistência à compressão[18].

3 | RESULTADOS

3.1 Relação água/cimento

A determinação da relação água/cimento se deu em função da consistência pré-fixada. Quanto maior a substituição da areia natural pela areia de fundição e quanto maior a quantidade de agregado no traço, maior foi a quantidade de água necessária para se atingir a consistência estabelecida, logo maior a relação água/cimento (Tabela 1).

TRAÇO	Substituição	TRAÇOS EM VOLUME			CONSISTÊNCIA (cm)	RELAÇÃO A/C
		Cimento	Areia natural	Areia fundição		
1:1,5	0	1,00	1,50	0,00	25,50	0,426
	1/3	1,00	1,00	0,50	25,80	0,551
	2/3	1,00	0,50	1,00	25,80	0,720
	3/3	1,00	0,00	1,50	26,00	1,164
1:3,0	0	1,00	3,00	0,00	26,80	0,811
	1/3	1,00	2,00	1,00	26,00	0,996
	2/3	1,00	1,00	2,00	25,00	1,104
	3/3	1,00	0,00	3,00	25,83	1,402

1:4,5	**0**	1,00	4,50	0,00	26,17	1,205
	1/3	1,00	3,00	1,50	25,93	1,294
	2/3	1,00	1,50	3,00	25,00	1,580
	3/3	1,00	0,00	4,50	25,43	1,843

Tabela 1 – Traços, consistências e relações água/cimento
Fonte: Autores.

Esse comportamento era esperado, uma vez que a areia de fundição é mais fina que a areia natural, demandando assim uma maior quantidade de água para molhagem completa das suas partículas.

3.2 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Os dados obtidos no ensaio de densidade de massa aparente foram submetidos à uma análise de variância (Tabela 2), na qual se constatou que existem diferenças significativas entre os traços, entre as substituições e na relação entre ambos.

Fonte	Soma quadrada (SQ)	Grau de liberdade (GDL)	Média quadrada (MQ)	Teste F	Probabilidade	Comentário
Traço	0,0923	2	0,0461	40,2	0,000000	Significativo
Substituição	0,2586	3	0,0862	75,1	0,000000	Significativo
Traço*Substituição	0,0497	6	0,0083	7,2	0,000042	Significativo
Erro	0,0413	36	0,0011			

Tabela 2 - Análise de variância (ANOVA) da densidade de massa
Fonte: Autores.

Ao analisar as substituições, percebe-se que quanto maior a quantidade de areia de fundição, menor a densidade da argamassa (Figura 2). Isso se deve à troca de um material mais pesado (areia natural), por outro um pouco mais leve (areia de fundição). Somado a isso, quanto maior a substituição, maior a quantidade de água demandada, que é mais leve do que o agregado e deixa maiores vazios, tornando a argamassa menos densa.

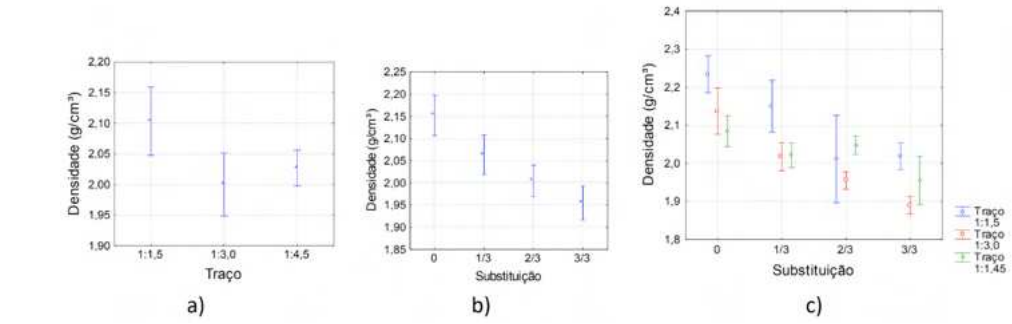


Figura 2 - Comparação da densidade de massa aparente: a) entre os traços avaliados; b) entre as substituições; c) traços *versus* substituição

Fonte: Autores.

3.3 Absorção de água por capilaridade

Os dados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade foram submetidos à uma análise de variância (Tabela 3), na qual se constatou que existem diferenças significativas entre os traços, entre as substituições, entre o tempo de ensaio e em toda relação entre os fatores controlados.

Fonte	Soma quadrada (SQ)	Grau de liberdade (GDL)	Média quadrada (MQ)	Teste F	Probabilidade	Comentário
Traço	1,53005	2	0,76502	322,653	0,000000	Significativo
Substituição	0,50981	3	0,16994	71,672	0,000000	Significativo
Tempo	1,15227	4	0,28807	121,494	0,000000	Significativo
Traço*Substituição	0,32336	6	0,05389	22,730	0,000000	Significativo
Traço*Tempo	0,16142	8	0,02018	8,510	0,000000	Significativo
Substituição*Tempo	0,12717	12	0,01060	4,470	0,000007	Significativo
Traço*Substituição*Tempo	0,10239	24	0,00427	1,799	0,020736	Significativo
Erro	0,28453	120	0,00237			

Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) da absorção de água por capilaridade

Fonte: Autores.

De modo geral, o traço de argamassa que absorveu menos foi o 1:1,5, seguido do 1:4,5 e do 1:3,0 (Figura 3a), esse comportamento pode ser explicado a partir do ensaios de densidade (Figura 2a), de modo que quanto mais densa, menor a absorção. Dentre as proporções de resíduo avaliadas, a ordem crescente de absorção de água ocorreu com a argamassa de substituição 0, seguida das argamassa com substituição 3/3, 1/3 e 2/3 (Figura 3b). As argamassas com 3/3 de substituição apresentaram um comportamento imprevisto, uma vez que se esperava que elas absorvessem uma maior quantidade de água dada a maior demanda de água no traço e a menor densidade

(mais vazios), porém elas mostraram um desempenho semelhante às argamassas com 0 de substituição. Uma explicação para esse comportamento é existência de vazios de maiores diâmetros não conectados uns aos outros, o que diminuiu a absorção por capilaridade (Figura 3c).

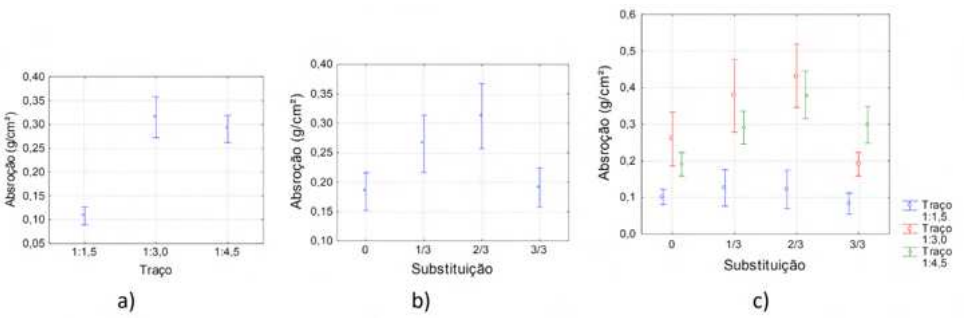


Figura 3 - Comparação da absorção por capilaridade: a) entre os traços avaliados; b) entre as substituições; c) traço *versus* substituição

Fonte: Autores.

3.4 Resistência à compressão

Os dados obtidos no ensaio de resistência à compressão foram submetidos à uma análise de variância (Tabela 4), na qual se constatou que existem diferenças significativas entre os traços, entre as substituições e na relação entre ambos.

Fonte	Soma quadrada (SQ)	Grau de liberdade (GDL)	Média quadrada (MQ)	Teste F	Probabilidade	**Comentário**
Traço	1097,506	2	548,753	1061,155	0,00	Significativo
Substituição	1411,148	3	470,383	909,606	0,00	Significativo
Traço*Substituição	1010,829	6	168,471	325,783	0,00	Significativo
Erro	18,099	35	0,517			

Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão

Fonte: Autores.

Conforme análise estatística realizada, o traço que apresentou o melhor desempenho mecânico foi o traço 1:1,5, seguido do traço 1:3,0 e do traço 1:4,5 (Figura 4a). Esse comportamento já era esperado, uma vez que a proporção de cimento é maior no traço 1:1,5 comparativamente aos demais traços, assim como a proporção de cimento no traço 1:3,0 é maior do que o traço 1:4,5.

Quando comparado as substituições, quanto maior a substituição de areia natural pela areia de fundição, menor a resistência mecânica (Figura 4b).

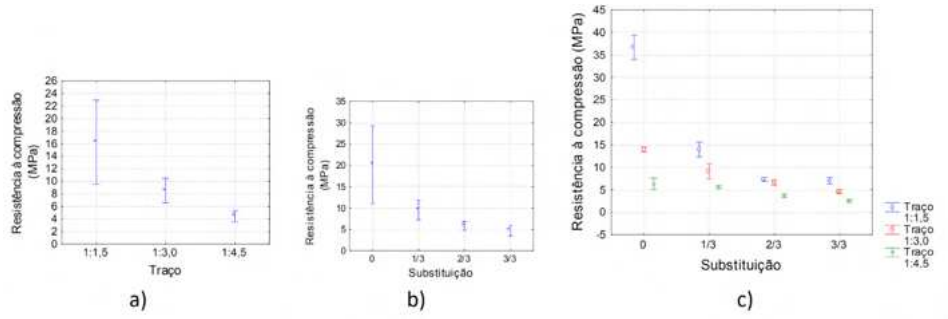


Figura 4 – Comparação da resistência à compressão: a) entre os traços avaliados; b) entre as substituições; c) traço *versus* substituição

Fonte: Autores.

Diante da diferença significativa da interação entre traço e substituição (Figura 4c), destacam-se alguns pontos:

- no traço 1:1,5 as substituições 2/3 e 3/3 apresentaram o mesmo desempenho, assim como no traço 1:4,5 não houve diferença significativa entre a argamassa sem substituição e a com 1/3 de substituição, logo uma maior incorporação de resíduo (traços 1:1,5 3/3 e 1:4,5 1/3) seria indicada;
- os traços 1:1,5 2/3, 1:1,5 3/3 e 1:3,0 2/3 apresentaram o mesmo desempenho mecânico, portanto, o traço 1:3,0 2/3 seria o mais indicado dado a menor proporção de cimento;
- os traços 1:4,5 0, 1:1,5 2/3 e 1:1,5 3/3 apresentaram o mesmo desempenho, assim como os traços 1:4,5 0 e 1:3 2/3, e os traços 1:3 0 e 1:1,5 1/3, evidenciando um maior consumo de cimento para se atingir um mesmo desempenho com substituições de areia de fundição.

Muito da queda da resistência à compressão das argamassas com substituição por areia de fundição se deu pelo aumento na demanda de água para se atingir uma mesma consistência e possivelmente pela distribuição granulométrica uniforme da areia de fundição. Uma possível solução para diminuir essa desigualdade de desempenho entre as argamassas seria o uso de aditivos plastificantes.

4 | CONCLUSÕES

A areia de fundição é um resíduo sensivelmente mais leve, muito mais fino e de granulometria mais uniforme do que a areia natural. Essas características afetaram diretamente as propriedades das argamassas produzidas, de forma que:

- por ser mais fina, a areia de fundição demanda uma maior quantidade de água para se atingir uma mesma consistência na argamassa;
- por ser mais leve, possuir uma granulometria uniforme e demandar mais

água, existe uma tendência de diminuir a densidade da argamassa com maiores teores de resíduo;

- por apresentar uma granulometria uniforme e demandar uma relação água/cimento maior, existe a tendência de diminuição da resistência à compressão da argamassa e aumento da absorção de água.

De modo geral, quanto maior a substituição de areia natural por areia de fundição, maior a tendência de diminuir a consistência demandando mais água, diminuindo a densidade, aumentando a absorção de água e diminuindo a resistência à compressão.

Para minimizar esses efeitos, pode-se aumentar a quantidade de cimento, obtendo-se traços mais fortes quando feita a substituição, para alcançar um mesmo desempenho. Entretanto, essa é uma solução não econômica.

Sugere-se, portanto, fixar a relação água/cimento junto com a utilização de aditivo plastificante nos traços com substituição de areia de fundição, na tentativa de diminuir a quantidade de água demandada (e seus efeitos), garantindo uma mesma consistência. Além disso, o controle da composição granulométrica dos agregados para obtenção de um aglomerado mais contínuo, traz benefícios significativos (como melhora da trabalhabilidade, compacidade e resistência) para o comparativo entre diferentes argamassas.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). Índices Setoriais. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/indices-setoriais/>. Acesso em: 16 de maio de 2021.

2. MARIOTTO, C. L. Regeneração de areias de fundição. **Seminário Nacional sobre Reuso/ Reciclagem de resíduos sólidos industriais**. São Paulo: SMA, 2000.

3. LOPES, L. R. N. **Avaliação da Redução dos Resíduos Sólidos de Areia Resinada em Fundição de Aço Através da Recuperação Térmica**. 2009. 94 f. Dissertação - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

4. ARMANGE, L. C.; NEPPEL, L. F.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N. H. A. Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa. **Revista Materia**, v. 10, n. 1, p. 51-62. Rio de Janeiro, 2005.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

6. MARCON, M. F. **Aproveitamento da areia de fundição como agregado miúdo fino em concretos.** 2013. 69 f. Trabalho de Conclusão (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

7. CASALI, J. M.; MIGUEL, T. F.; FELIZARDO, C. C.; MEIRA, N. S.; DOMINGUINI, L.; BETIOLI, A. M. Characterisation and influence of the contente of waste foundry sand on rendering mortars. **Revista Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, Porto Alegre, 2018.

8. OLIVEIRA, D. F. de. **Caracterização dos finos de areia de uma fundição e sua incorporação em argamassa de cimento.** 2014. 57 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2014.

9. DAMASCENO, B. C.; AMERICO, J. D. Utilização de areia de fundição na produção de blocos de concreto sem função estrutural. *In:* Congresso PICJR, 2012, Campinas. **Anais [...]**. Campinas, 2012.

10. MARTINI, N. C. **Reuso de areia descartada de fundição para a confecção de blocos de concreto estrutural.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica do Paraná, Londrina, 2017.

11. CAMPOS, M. A.; FERRÃO, A. M. A.; FERNANDES, F. A. A.; CAZELA, A. M. Blocos de concreto com areia de descarte de fundição: um case de sucesso de viabilidade econômica, propriedades mecânicas e de durabilidade. *In:* 18° Congresso ABIFA de Fundição. **Anais**[...]. 2019.

12. ANGST, M; VENDRUSCOLO, M. A. Aproveitamento da Areia de Fundição na Produção de Tijolos. *In:* II Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 2, 2015, Itajaí, SC. **Anais Eletrônicos**[...]. Itajaí: ENSUS, 2015. p. 1-11.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

14. ____. **ABNT NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

15. ____. **ABNT NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

16. ____. **ABNT NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

17. ____. **ABNT NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

18. ____. **ABNT NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.



CAPÍTULO 37

CINZAS DE BIOMASSA GERADAS NA AGROINDÚSTRIA DE MALTE: CARACTERIZAÇÃO E USO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081137

DA SILVA; SAUANA CENTENARO[1]; DA SILVA; JOAÕ ADRIANO GODOY[2]; PAULINO; RAFAELLA SALVADOR[3]
[123]FACULDADE GUARAPUAVA
RAFAELLASPAULINO@GMAIL.COM

RESUMO: Este estudo analisou a viabilidade do uso de cinzas de caldeira (CC) para a produção de argamassas. As CC foram caracterizadas física e quimicamente. Produziram-se argamassas de traço 1:3, em massa, com teores de substituição de 0, 5, 10, 15 e 20% e relação a/c de 0,7. O aumento do teor de substituição provocou redução da trabalhabilidade e da densidade de massa e aumento do teor de ar incorporado, da absorção de água e da porosidade, para todas argamassas. Verificou-se manutenção da resistência à compressão nos teores de 10 e 15% e aumento para o teor de 20%, em comparação à referência.

PALAVRAS-CHAVES: ENARC2021, cinzas de caldeira, eucalipto, grãos, substiuição.

ABSTRACT: This study analyzed the feasibility of using boiler ash (CC) for the production of mortars. CC were characterized physically and chemically. Mortars with a mix of 1:3 by mass were produced, with replacement contents of 0, 5, 10, 15 and 20% and w/c ratio of 0.7. The increase in the replacement content caused a reduction in workability and mass density and an increase in the incorporated air content, water absorption and porosity for all mortars. There was maintenance of compressive strength at 10 and 15% grades and an increase at 20% grade, compared to the reference.

KEYWORDS: ENARC2021, boiler ash, eucalyptus, grains, replacement.

1 | INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores responsáveis pelos grandes impactos negativos causados à natureza, devido ao grande consumo de matérias-primas, energia e água, além da excessiva geração de resíduos. Dessa forma, os materiais de construção vêm sendo avaliados não apenas pelas suas propriedades e desempenho, mas também quanto à sustentabilidade, pela maneira como são produzidos e pelo impacto que o seu processamento gera ao meio ambiente (FREITAS, 2005[(1)]; CANOVA; MIOTTO; DE MORI, 2015[(2)]).

Dentre os materiais da construção civil, tem-se a areia, muita utilizada para a produção de argamassas e concreto, que pode ter sua origem em rios, em depósitos sedimentares, de cavas, de praias e dunas e a partir da britagem (BAUER, 2012[(3)]). A extração de areia em rios tem degradado o ambiente aquático e em muitas vezes os impactos dessa extração são irreversíveis (FARIAS et al., 2012[(4)]). Devido a isso, inúmeras

pesquisas têm sido realizadas sobre a viabilidade da substituição do agregado miúdo por resíduos das mais variadas origens, como as cinzas geradas pela queima de outros resíduos, oriundos de indústrias como a de papel e celulose, olarias, termoelétricas e caldeiras de secagem de grãos da agricultura (MANNAN; GANAPATHY, 2004[5]).

Aliado a isto, a geração de energia da biomassa é responsável por uma grande produção de cinzas, cuja maior parte é enviada para aterros (FARINHA; BRITO; VEIGA, 2019[6]). Com a necessidade de retirada a baixo custo, esse resíduo acaba sendo destinado incorretamente, depositado em áreas impróprias e sem o devido tratamento. A disposição de cinzas sem o correto tratamento gera a lixiviação o que possibilita que metais pesados e sulfatos penetrem no lençol freático contaminado a água (MAEDA *et al.*, 2008[7]; CACURO; WALDMAN, 2015[8]).

Teixeira *et al*. (2019)[9] estudou o efeito da utilização de cinza volante de biomassa (CVB) na produção de argamassas e verificou que o uso da CVB em pequenas quantidades misturadas com cinzas volantes de carvão resultou em argamassas com resistência à compressão semelhantes à de uma argamassa de cimento. Tosti *et al.* (2019)[10] avaliou as propriedades mecânicas e ambientais de argamassas de cimento contendo cinzas volantes da combustão de biomassa como material cimentício secundário e concluiu que o desempenho técnico das argamassas de cimento foi influenciado pelo tipo e proporção de cinza volante misturada com cimento. Novais *et al.* (2019)[11] estudou o uso de resíduos provenientes da produção de celulose e papel como preenchimento fino na produção de argamassas geopoliméricas e confirmou a viabilidade do seu uso.

Dessa forma, por existir muitas indústrias que utilizam as caldeiras no processo de produção na região de Guarapuava -PR, sendo a maltaria da Agrária, a maior da América Latina, as cinzas oriundas da queima de madeira de eucalipto e de cascas de grãos nas caldeiras são matéria deste estudo, que tem como objetivo a caracterização destas cinzas de biomassa com vistas a seu uso em substituição ao agregado miúdo na produção de argamassas.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Na produção das argamassas foi utilizado o cimento Portland CP V- ARI, pelo fato de ser um cimento sem adições, a fim de qualificar melhor a reatividade das cinzas. O agregado miúdo utilizado foi a areia quartzosa de rio, cuja massa específica é de 2,62 g/cm³, obtida segundo a ABTN NBR NM 52:2009[12] e módulo de finura de 1,53, determinado conforme a ABNT NBR NM 248:2003[13], classificando-se como areia fina. A cinza de caldeira (CC) utilizada foi fornecida pela Maltaria da Agraria e é oriunda da queima de eucalipto e também resíduos da agroindústria, como grãos e cascas, caracterizando a CC como um resíduo misto.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação e caracterização da CC

A cinza de caldeira (CC) (Figura 1) foi submetida a um processo de moagem,

utilizando-se um moinho de martelo para moer os grãos maiores, que em seguida, passaram por um moedor de café e por um processo manual, com o auxílio de um socador almofariz de porcelana. Posteriormente, as CC foram caracterizadas fisicamente da mesma forma que a areia.



Figura 1 – Cinza após moída e peneirada.

Com relação à caracterização química, as CC foram avaliadas quanto ao índice de atividade pozolânica, segundo a ABNT NBR 5751:2015[14], conforme a exigências da ABNT NBR 12653:2015[15], quanto à sua composição química, a partir de uma microscopia eletrônica de varredura (MEV) e para determinação do teor de matéria orgânica residual, por meio do ensaio de perda ao fogo.

2.2.2 Produção e caracterização das argamassas

Foram produzidas argamassas de traço básico de 1:3, em massa, e relação água/cimento de em 0,70, com substituição da areia pela CC, em quatro diferentes teores (5, 10, 15 e 20%), além da referência, sem substituição, baseando-se na revisão de literatura. As argamassas foram produzidas e avaliadas no estado fresco, quanto ao seu índice de consistência (ABNT NBR 13276:2016)[16], densidade de massa e teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278:2005) [17]. Moldaram-se onze corpos de prova cilíndricos (5x10 cm) e seis corpos de prova prismáticos (5x5x10 cm), para cada teor de substituição e após 24 horas de cura, os corpos de prova foram desformados, identificados e submersos em tanque de água saturada de cal, onde permaneceram até as idades estabelecidas para a realização dos seguintes ensaios no estado endurecido: resistência à compressão axial (ABNT NBR 7215:2009)[18] e resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279:2005) [19] aos 7 e 28 dias, absorção de água e índice de vazios (ABNT NBR 9778:2009) [20] aos 28 dias.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Caracterização da CC

A CC foi caracterizada fisicamente e obteve-se o valor de massa específica de 2,31g/cm³, que é inferior à do agregado miúdo (2,62g/cm³), fator esse que pode ser explicado devido as partículas fibrosas presentes na cinza serem oriundas da queima incompleta do eucalipto e dos resíduos (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015)[21]. Ainda

fisicamente, foi determinada a composição granulométrica da CC, que apresentou módulo de finura de 3,11, classificando-se como grossa.

Na caracterização química da CC, o ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) determinou que a CC analisada não pôde ser classificada como material pozolânico por não possuir resistência à compressão de no mínimo 6MPa na reação com a cal. A média dos valores obtidos pela CC foi de 1,35MPa, representando menos do 25% do mínimo exigido em norma. Referente à composição química, no ensaio de microscopia eletrônica de varredura, a Tabela 1 demonstra quantidade em percentual de massa desses determinados elementos químicos presentes na amostra analisada.

	C (%)	O(%)	Mg(%)	Al(%)	Si(%)	P(%)	Cl(%)	K(%)	Ca(%)
Espectro 1	17.088	41.250	2.142	1.135	13.947	3.737	1.369	10.944	8.389
Espectro 2	45.163	25.873	1.082	0.547	9.697	1.986	1.255	8.321	6.075
Espectro 3	8.720	36.633	4.766	1.170	8.984	4.100	4.215	12.423	18.990
Espectro 4	10.659	49.969	2.881	0.510	15.059	2.450	0.000	7.574	10.897

Tabela 1 – Quantidade em percentual de massa dos elementos químicos.

Conforme os dados apresentados sobre a composição da CC, pode-se concluir que no geral a mesma apresenta uma composição homogênea, com exceção de alguns pontos, que possuem uma maior porcentagem de Carbono, como foi possível observar no Espectro 2. Segundo De Paula (2006)([22]), a verificação de até 20% de carbono não afeta as características mecânicas da argamassa, porém pode ser percebido um decréscimo dessa resistência quando o teor de carbono passa de 30% e isso pode acontecer devido a baixa quantidade de sílica quando se tem elevada quantidade de carbono, fato que é comprovado na Tabela 1, Espectro 2 que possui altíssimo nível de carbono e baixo de sílica.

Em relação à análise termogravimétrica da cinza, a Figura 2 apresenta a alteração de massa da amostra quando submetida a mufla até 1000ºC.

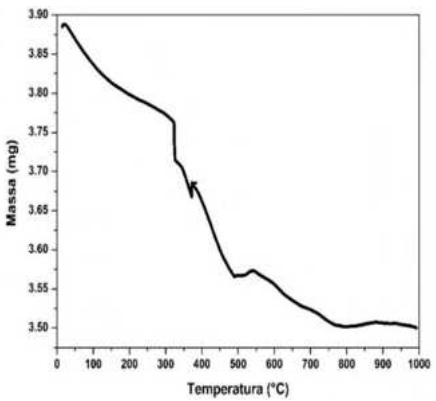


Figura 2 – Ensaio em mufla, perda de fogo.

Verificou-se que, como a cinza é resultante da queima há 300, após a perda de água, a uma temperatura de 100, não há nenhuma perda importante de massa até em torno 350. A partir dessa temperatura verifica-se uma redução da massa e uma estabilidade após os 800.

3.2 Propriedades avaliadas nas argamassas

3.2.1 Estado fresco

Os resultados das argamassas, no estado fresco, para o índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 2.

Teor de Substituição	Índice de consistência (mm)	Densidade de Massa (g/cm³)	Teor de Ar Incorporado (%)
0%	300	1,844	8
5%	280	1,818	9
10%	230	1,808	10
15%	190	1,798	10
20%	190	1,762	12

Tabela 2 – Índice de consistência da argamassa.

Nota-se que o índice de consistência da argamassa diminuiu gradativamente conforme aumentou a porcentagem de substituição da areia pela CC. A redução da fluidez da argamassa provocada pela CC pode ser explicada pela morfologia da cinza, uma vez que as partículas possuem formatos irregulares, o que faz com que estas necessitem de mais água para o molhamento completo da sua superfície (MORAES, 2001)[23]. Referente à densidade de massa, é possível observar uma pequena redução com o aumento dos teores de substituição e ao teor de ar incorporado, pode-se observar um aumento gradual de mais de 4% conforme se aumenta os teores de substituição da areia por CC.

3.2.2 Estado endurecido

Os resultados para absorção de água e índice de vazios estão apresentados na Tabela 3.

Teor de Substituição	Absorção de água (%)	Desv. Pad. (%)	CV (%)	Índice de Vazios (%)	Desv. Pad. (%)	CV (%)
0%	13,91	0,16	1,16	25,74	0,18	0,70
5%	15,50	0,14	0,93	28,02	0,25	0,89
10%	16,36	1,08	6,62	29,02	1,26	4,33
15%	17,05	0,05	0,31	29,45	0,12	0,41

20%	15,55	2,94	18,93	27,32	4,56	16,69

Tabela 3 – Absorção de água e índice de vazios.

Observa-se que tanto para a absorção de água quanto para o índice de vazios, os resultados são crescentes com o aumento dos teores de substituição, exceto para o teor de 20%. O fato das argamassas com maiores teores de CC tenderem a ser mais porosas pode ser justificado pelas cinzas, em geral, possuírem textura rugosa e superfície poros. Quanto à resistência à compressão axial e à tração, os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Teor de Substituição	Idade (dias)	Resist. à comp. (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	Resist. à tração (MPa)	Desv. Pad. (MPa)
0%	7	12,303	1,442	7,13	1,05
	28	13,246	0,672	7,33	0,83
5%	7	10,458	0,584	6,51	0,35
	28	11,758	0,350	6,56	0,55
10%	7	10,228	0,858	6,97	0,53
	28	13,225	0,346	8,66	0,81
15%	7	10,018	1,558	6,44	1,00
	28	13,225	0,346	7,66	0,74
20%	7	10,081	0,734	7,89	0,81
	28	15,843	0,223	8,73	0,92

Tabela 4 – Resistência média à compressão e à tração nas idades de 7 e 28 dias.

Aos 28 dias, observou-se um aumento gradativo da resistência à compressão, superando o valor da referência, para o teor de substituição de 20%. Para a resistência à tração, aos 28 dias, houve uma perda em relação a referência apenas para o teor de 5%, os demais teores apresentaram ligeiro aumento de resistência em relação à referência, sendo o mais alto deles, para o teor de 20%. Estas diferenças de comportamento podem estar relacionadas às diferentes origens dos resíduos utilizados nos estudos e à natureza mista da CC, compostas pela queima de eucalipto e grãos.

4 | CONCLUSÕES

Concluiu-se que embora a CC não tenha apresentado compostos químicos que permitam o desenvolvimento de atividades pozolânicas com os compostos hidratados do cimento, ainda assim foi possível a manutenção das propriedades mecânicas das argamassas, ao utilizá-las em substituição à areia. Recomenda-se em função das resistências à compressão e à tração, o teor de substituição de 20%, indicando uma destinação adequada do resíduo com o potencial de reduzir a extração de agregados naturais, desde que também seja investigada a durabilidade dos materiais para que se

possa estabelecer melhores parâmetros de utilização.

AGRADECIMENTOS

À Maltaria Agrária por disponibilizar a matéria prima deste trabalho e ao Departamento de Química na Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela prestação de serviços.

REFERÊNCIAS

1. FREITAS, E. S. Caracterização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos dos Goyacazes para o uso na construção civil, **Dissertação**, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2005.

2. CANOVA, J. A.; MIOTTO, J. L.; DE MORI, L.M. A avaliação de argamassa mista de revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana-de-açúcar, **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 1, pp 125-134, Jan. 2015.

3. BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção Civil**: Novos Materiais para Construção Civil. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc. Pp 471, 2012.

4. FARIAS, M. S. S.; LIMA, V. L. A.; DANTAS NETO, J.; LEITE, E. P. F.; ANDRADE, A. R. S. Degradação da bacia hidrográfica do rio cabelo e os efeitos ao meio ambiente, **Principia**, v. 10, n. 14, 2006.

5. MANNAN, M. A.; GANAPATHY, C. Concrete from an agricultural waste oil-palm shell (OPS). **Building and Environment**, v. 39, p. 441-448, 2004.

6. FARINHA, C. B.; BRITO, J; VEIGA, R. Influence of forest biomass bottom ashes on the fresh, water and mechanical behaviour of cement-based mortars. **Resources, Conservation and Recycling,** v. 149, p. 750-759, 2019.

7. MAEDA, S.; DA SILVA, H. D.; CARDOSO, C. Resposta de Pinus taeda à aplicação de cinza de biomassa vegetal em Cambissolo Húmico, em vaso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n.56, p.43-52, jan./jun. 2008.

8. CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades, **Revista Virtual de Química**, v. 07, n. 06, p. 2154-2165, 2015.

9. TEIXEIRA, E. R.; MATEUS, R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. G. Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar. **Construction and Building Materials,** v. 197, p. 195-207, 2019.

10. TOSTI, L.; ZOMEREN, A. van; PELS, J. R.; COMANS, R. N. J. Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 25-33, 2018.

11. NOVAIS, R. M.; CARVALHEIRAS, J.; SENFF, L.; LABRINCHA, J. A. Upcycling unexplored dregs and biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars: A preliminary assessment. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 464-472, 2018.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÈCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

13. _____. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

14. _____. **NBR 5751.** Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

15. _____. **NBR 12653.** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

16. _____. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

17. _____. **NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

18. _____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

19. _____. **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.

20. _____. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

21. BAHURUDEEN, A., SANTHANAM, M., Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash, **Cement and Concrete Composites**, v. 56, pp. 32-45, 2015.

22. DE PAULA, M. O. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açucar como material de substituição parcial de cimento Portland, **Dissertação** de Mestrado., UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2006.

23. MORAES, R. C. Efeitos Físicos e Pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto. 2001. 178 f. **Dissertação** (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.



CAPÍTULO 38

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCD EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL AOS NATURAIS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETOS ADENSADOS DE FORMA MANUAL E MECÂNICA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081138

SARTORE; IGOR CARLESSO[1]; PAULINO; RAFAELLA SALVADOR[2]; TORALLES; BERENICE MARTINS[3]
[123]UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA
RAFAELLASPAULINO@GMAIL.COM

RESUMO: A reutilização de RCD tem sido uma alternativa sustentável na indústria da construção civil. Este trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade do uso de blocos de concreto fabricados com a incorporação de agregados de RCD em substituição total aos naturais. Foram produzidos blocos de dimensões de 19 x 19 x 39 cm, segundo os procedimentos de moldagem manual e mecânica, submetidos aos ensaios de absorção de água e resistência à compressão. Os resultados mostraram que os blocos fabricados de forma mecânica obtiveram melhor desempenho, podendo ser utilizados em alvenarias não estruturais com resistência superior a 2,0 MPa.

PALAVRAS-CHAVES: ENARC2021, sustentabilidade, reciclagem, agregados reciclados, vedação.

ABSTRACT: The reuse of RCD has been a sustainable alternative in the construction industry. This work had as objective to verify the viability of the use of concrete blocks manufactured with the incorporation of aggregates of RCD in total substitution to the natural ones. Blocks of dimensions 19 x 19 x 39 cm were produced, according to manual and mechanical molding procedures, subjected to water absorption and compression resistance tests. The results showed that the blocks manufactured mechanically had a better performance, being able to be used in non-structural masonry with resistance greater than 2.0 MPa.

KEYWORDS: ENARC2021, sustainability, recycling, recycled aggregates, sealing.

1 | INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da construção civil é responsável pela transformação do ambiente natural em ambiente construído. Embora este setor seja considerado um dos setores mais tradicionais, ainda apresenta alto consumo de matérias-primas e é considerado um dos que mais polui o meio ambiente (PASSUELLO, 2014; MELLO, AMORIM, 2009)[1, 2]. Os resíduos de construção e demolição (RCD) são definidos como todo rejeito oriundo das etapas necessárias para a construção civil, os quais, muitas vezes, são despejados de forma irregular, através de bota-fora clandestino, em margens de rios, córregos e em terrenos baldios, o que pode gerar problemas de contaminação no solo e na água subterrânea (LEITE, 2001; BARROS, FACULE, 2016)[3,4]. No Brasil, a importância do gerenciamento destes resíduos é abordada na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 307 (BRASIL, 2002)[5], que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos por meio de diretrizes, critérios e procedimentos para sua gestão (BARROS;

FACULE, 2016)[4]. Para minimizar o impacto ambiental provocado pelas construções, a reciclagem surge como uma das soluções para o controle do descarte excessivo de resíduos pelas indústrias e construtoras, assim como para evitar o acúmulo de lixo, principalmente em locais inadequados (JOHN; AGOPYAN, 2000; LOMASSO, 2015)[6,7].

Gomes et al. (2017)[8] a partir de seus estudos, confirmou a viabilidade de se produzir blocos de concreto estruturais com agregados reciclados oriundos do processo de produção desses blocos, os quais atenderam aos requisitos de resistência à compressão da ABNT NBR 6136:2016[9]. Os resultados da pesquisa de Souza, Soriano e Patino (2018)[10] mostraram que os blocos produzidos com a substituição de 80% do agregado miúdo por agregados oriundos do resíduo de tijolos cerâmicos apresentaram um elevado desempenho mecânico e comprovada viabilidade econômica. Guo *et al.* (2018)[11], demonstraram em sua pesquisa que é possível utilizar agregados reciclados de concreto para produção de blocos para construção civil, destacando os benefícios ambientais que esta medida traz. Zhao et al. (2020)[12] destaca que esta é uma rota de desenvolvimento interessante para diminuir o impacto ambiental da produção de blocos de concreto.

Sendo assim, este trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade de fabricação e uso de blocos de concreto com a incorporação de RCD, compactados de forma manual e em mesa vibratória, a fim de ser uma alternativa sustentável de aplicação do material que contribua com a sustentabilidade na indústria da construção civil.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos materiais

O cimento utilizado para produção dos blocos foi do tipo Portland CP V-ARI, visando a evolução mais rápida das resistências do concreto às primeiras idades, para que a integridade na desforma e durante a movimentação da peça fosse garantida. Os RCD utilizados foram provenientes da reforma realizada na Pró-Reitoria de Graduação (PROGRAD) na Universidade Estadual de Londrina (Figura 1). Foi realizada a triagem dos RCD, seguida de trituração em um britador de mandíbulas, obtendo-se duas frações distintas: uma composta por agregados maiores que 4,8mm e outra por agregados menores que 4,8mm.



Figura 1 – Resíduos de RCD oriundos da UEL.

Fonte: Os autores (2018).

Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados de RCD, de acordo com as prescrições das normas técnicas, foram: determinação da composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003)[13]; determinação da massa unitária (ABNT NBR NM 45:2006) [14]; determinação da massa específica dos agregados miúdos (ABNT NBR NM 52:2009) [15]e graúdos (ABNT NBR NM 53:2009)[16]; teor de material pulverulento (ABNT NBR NM 46:2003)[17]; absorção de água dos agregados miúdos (ABNT NBR NM 30:2001)[18]e graúdos (ABNT NBR NM 53:2009)[16].

2.2 Produção do concreto

Preliminarmente à fabricação dos blocos, foram estudados diferentes traços de concreto, a partir de um traço referência baseado na literatura, substituindo-se totalmente os agregados naturais por agregados de RCD. O traço de referência foi ajustado (Traço 1), devido a ocorrência de exsudação no momento de moldagem dos corpos de prova, e a partir deste foram estudados outros dois traços (Traços 2 e 3), variando-se as quantidades de agregados graúdo e miúdo reciclados, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 1.

Nomenclatura	Cimento : Areia : Pedrisco : a/c
Traço Ref.	1,00 : 5,00 : 3,08 : 0,98
Traço 1	1,00 : 4,70 : 2,20 : 1,05
Traço 2	1,00 : 4,70 : 1,85 : 0,99
Traço 3	1,00 : 5,48 : 2,20 : 1,07

Tabela 1 – Traços dos concretos estudados (em massa).

A partir dos traços estabelecidos, os concretos foram produzidos utilizando-se betoneira de eixo inclinado. Moldaram-se quatro corpos de prova de dimensões de 10x20 cm para cada traço, segundo as recomendações da NBR 5738:2015[19]. No estado endurecido, os concretos foram avaliados quanto à massa específica e resistência à compressão axial, aos 3, 7, e 28 dias, conforme as normas ABNT NBR 9778:2009[20] e ABNT NBR NM 5739:2007[21], respectivamente.

2.3 Produção dos blocos

Procedeu-se a produção dos blocos de concreto utilizando-se o Traço 1 ajustado para 1:4,85:2,20:0,87, com redução da quantidade de água devido à consistência elevada e aumento da quantidade de finos, visando melhoria no acabamento da superfície da peça. Utilizando-se o concreto de RCD, moldaram-se doze blocos de RCD de forma manual e outros doze, com compactação em mesa vibratória, todos na dimensão de 19x19x39cm, enquadrando-os na família M-20, segundo a ABNT NBR 6136:2016[9]. A moldagem manual foi realizada da seguinte maneira: enchimento parte inferior da forma com concreto (Figura 2a), posicionamento da parte superior da forma, comprimindo a massa de concreto (Figura 2b), remoção da parte inferior da forma (base) através do apoio nas aletas laterais da parte superior da mesma (Figura 2c). A compactação foi realizada por um único operador, a fim de minimizar efeitos de variação da energia.

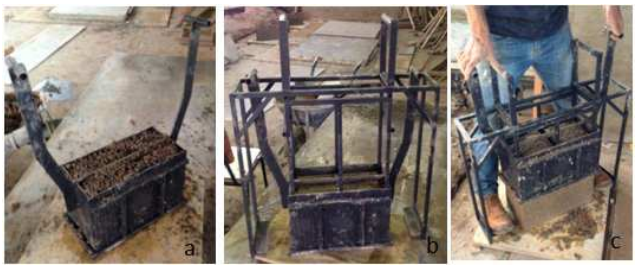


Figura 2 – Parte inferior da forma preenchida com concreto até a superfície.

Fonte: Os autores (2018).

A compactação em mesa vibratória se deu com preenchimento da forma com concreto em duas camadas, seguido da vibração da forma na mesa, em dois ciclos de 4s a 6s. Foi feito o posicionamento da parte superior da forma e realizou-se o último ciclo de vibração da mesa, e por fim, a desforma de forma análoga ao primeiro procedimento. Após a desmoldagem foram tomados os devidos cuidados no transporte e manuseio dos blocos recém-fabricados, os quais foram colocados em ambiente protegido e curados com aspersão de água durante os dois primeiros dias. Entre 3 e 28 dias os blocos foram curados ao ar, em ambiente de laboratório, até o momento da realização dos ensaios de caracterização.

2.4 Ensaios de caracterização

Os blocos de RCD foram submetidos aos ensaios para determinação do índice de absorção de água aos 28 dias e da resistência à compressão axial, aos 3, 7 e 28 dias de idade, seguindo as prescrições da ABNT NBR 12118:2013[(22)].

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Agregados de RCD

Os resultados de caracterização física dos agregados de RCD estão apresentados na Tabela 2.

Ensaios realizados	A.M.	A.G.
Módulo de finura	2,74	5,89
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	9,60
Massa unitária (g/cm³)	1,33	1,10
Massa específica (g/cm³)	2,47	2,29
Teor de material pulverulento (%)	2,50	3,50
Absorção de água (%)	5,50	7,00

Tabela 2 – Índices físicos dos agregados de RCD.

Os valores de dimensão máxima característica (DMC) apresentados na Tabela 2 mostram que o agregado graúdo está compreendido dentro do limite estabelecido pela ABNT NBR 6136:2016[9], que recomenda que este valor não ultrapasse metade da menor espessura da parede do bloco, neste caso, de 20mm, tendo em vista o valor mínimo aceitável para a família M-20 ser de 15mm. Estudos mostram que as massas específicas e unitárias dos agregados de RCD são em torno de 5 a 10% mais baixos que os valores dos agregados naturais, podendo os números variarem um pouco de acordo com a origem e granulometria do material (LINTZ *et al.*, 2012)[23]. Os teores de material pulverulento dos agregados de RCD apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, não ultrapassando 10% para o agregado miúdo e 20%, para o graúdo.

3.2 Concretos de RCD

Os resultados dos ensaios de caracterização dos concretos de RCD encontram-se na Tabela 3.

Ensaios	Ref.	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Massa específica (kg/m³)	1800	1780	1830	1790
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	3,70	6,25	6,80	3,55

Tabela 3 – Caracterização do concreto.

Os valores de massa específica apresentados na Tabela 3 indicam, para os três traços, que o concreto produzido com RCD pode ser caracterizado como leve, de acordo com a classificação da ABNT NBR 12655:2015[24] uma vez que possuem massa específica inferior a 2000 kg/m³. Isso ocorre, possivelmente, devido à menor massa especifica dos agregados reciclados que o compõem, bem como por um maior teor de vazios incorporado ao concreto. Com relação à resistência à compressão, os resultados apresentados mostram que os concretos de traços 1 e 2 obtiveram desempenhos mais satisfatórios e isto justifica o fato do traço 1 ter sido escolhido para a produção dos blocos, tendo em vista possuir ainda menor consumo de cimento (310,81 kg/m³) que o traço 2 (323,62kg/m³). Os baixos valores de resistência à compressão dos concretos podem ser justificados pelo aumento na quantidade de água de amassamento necessária para a produção dos concretos, uma vez que há diminuição da trabalhabilidade devido possivelmente às irregularidades de formatos dos agregados de RCD, advindas do processo de fabricação pela britagem de resíduos maiores, que conduzem a diferentes áreas superficiais e à sua elevada absorção de água (LINTZ *et* al., 2012; GONÇALVES, 2011)[23,25].

3.3 Blocos de RCD

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos blocos de RCD, compactados de forma manual e em mesa vibratória.

Idade	Forma Manual			Mesa Vibratória		
	Resist. (MPa)	Desv. Pad.	CV (%)	Resist. (MPa)	Desv. Pad.	CV (%)
3 dias	0,45	0,06	14,30	1,17	0,06	4,95
7 dias	0,56	0,08	14,01	1,57	0,15	9,75
28 dias	0,66	0,06	8,57	2,07	0,21	10,07

Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias.

Analisando-se os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, verifica-se que apenas os blocos fabricados em processo mecânico atendem os requisitos da ABNT NBR 6136:2016[9], enquadrando-se na Classe D, como blocos de concreto para uso em alvenarias não estruturais com resistência superior a 2,0 MPa. Os resultados também demonstraram que a resistência à compressão dos blocos conformados de forma mecânica apresentou valores superiores aos fabricados de forma manual, isto ocorre, possivelmente devido à energia de compactação utilizada na vibração, sendo o desempenho da vibro-prensa responsável pela qualidade final dos elementos fabricados (FRASSON JUNIOR, 2000)[26].

Relacionado à absorção de água, os blocos de concreto de RCD apresentaram o valor médio de 16,0%, o qual encontra-se um pouco acima do limite especificado pela norma ABNT NBR 6136:2016[9], que admite um valor médio máximo de 13,0%. No entanto, analisando-se de forma individual, alguns blocos se enquadrariam na especificação da norma, que admite um valor máximo de 16,0%. Os altos valores de absorção de água podem estar relacionados, possivelmente, às características dos agregados reciclados que constitui os blocos, em especial à maior absorção de água dos mesmos em comparação aos naturais, pois geralmente apresentam argamassa e materiais cerâmicos aderidos à sua superfície (LEITE, 2001)[3].

4 | CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa permitiu concluir que a heterogeneidade do RCD pode afetar diretamente as propriedades físicas, mecânicas e visuais das peças, e que o processo de produção dos blocos é um fator limitante para se obterem resultados positivos. Verificou-se que apenas os blocos de RCD fabricados com compactação em mesa vibratória podem ser utilizados para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo, sem função estrutural, classificados como Classe D, segundo a ABNT NBR 6136:2016[9]. Concluiu-se ainda que a reutilização de RCD para a produção de blocos de concreto dentro do processo produtivo de uma Universidade mostra-se como grandioso, uma vez que alia as vertentes sustentável e econômica, reduzindo os custos com deposição de resíduos e propiciando o reuso como matéria-prima de um novo produto, de valor agregado.

REFERÊNCIAS

1. PASSUELLO, A. C. B. et al. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 7–20, 2014.

2. MELLO, L. C. B. DE B.; AMORIM, S. R. L. DE. O subsetor de edificações da construção civil no Brasil: uma análise comparativa em relação à União Europeia e aos Estados Unidos. **Production**, v. 19, n. 2, p. 388–399, 2009.

3. LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

4. BARROS, E.; FUCALE, S. O Uso De Resíduos Da Construção Civil Como Agregados Na Produção De Concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 1, 2016.

5. BRASIL. Resolução **CONAMA Nº 307**, de 5 de julho de 2002, Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, de 17 de jul. de 2002, Brasília, DF, seção1, páginas 95-96. p. 95–96, 2002.

6. JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. p. 12, 2000.

7. LOMASSO, A. L. et al. Estudo De Caso No Centro Mineiro De Referência Em Resíduos (CMRR). **Revista Pensar Gestão e Administração**, v. 3, n. 2, p. 1–18, 2015.

8. GOMES, P. C. C. et al. Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 267–280, 2017.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136** - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

10. SOUZA, M. F. DE; SORIANO, J.; PATINO, M. T. O. Resistência à compressão e viabilidade econômica de blocos de concreto dosado com resíduos de tijolos cerâmicos. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 2018.

11. GUO, Z. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 136–149, 2018.

12. ZHAO, Z. et al. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, n. February, 2020.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados -Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios," *Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118** - Blocos vazados de concretos simples para alvenaria - Metódos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

23. LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; L. A., GACHET-BARBOSA. Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 166–181, 2012.

24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

25. GONÇALVES, R. D. C. **Agregados Reciclados De Resíduos De Concreto - Um Novo Material Para Dosagens Estruturais**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

26. FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** Dissertação de mestrado, 146 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL POR PÓ DE PEDRA EM TUBOS DE CONCRETO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081139

COLONETTI; LUÍS GUSTAVO VIEIRA[1]; PIROLLA; DOUGLAS LEFFA[2]; PIVA; JORGE HENRIQUE[3]; MACCARINI; HELENA SOMER[4]; WANDERLIND; AUGUSTO[5]; ANTUNES; ELAINE GUGLIELMI PAVEI[6]
[1]UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC; [2]UNESC; [3]UNESC; [4]UNESC; [5]UNESC; [6]UNESC.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ELAINEGPA@UNESC.NET

RESUMO: Esta pesquisa tem por finalidade analisar a influência da substituição da areia natural pelo pó de pedra na fabricação de tubos de concreto de 400 mm. Para tal, foram executados tubos de concreto com cinco diferentes traços, sendo o primeiro, considerado de referência, e os outros quatro com percentuais de substituições de 100, 75, 50 e 25% da areia natural pelo pó de pedra. Para análise dos tubos realizou-se ensaios de resistência à compressão diametral e de absorção de água. Verificou-se que a resistência à compressão não foi influenciada pela substituição, no entanto, houve um aumento na absorção de água.

PALAVRAS-CHAVES: Artefatos de concreto; drenagem urbana; componente de concreto, pó de pedra.

ABSTRACT: This research aims to analyze the influence of replacing natural sand by stone powder in the manufacture of concrete pipes of 400 mm. For this purpose, concrete pipes were made with five different mixes, being the first one considered as the reference, and the other four with replacement percentages of 100, 75, 50 and 25% of the natural sand by stone powder. For the analysis of the pipes, strength tests were performed for diametrical compression and water absorption. It was verified that the compressive strength was not influenced by the substitution, however, there was an increase in water absorption.

KEYWORDS: Concrete artifacts; urban drainage; concrete component; stone powder.

1 | INTRODUÇÃO

O índice de construção civil vem obtendo crescimento significativo nos últimos anos e a disponibilidade de materiais de construção no mercado contribuem para tal crescimento. Dentre os materiais de construção que contribuem para o desenvolvimento destacam-se os materiais que são empregados em grande volume, como por exemplo, os agregados. Os agregados são materiais amplamente utilizados na construção civil e, principalmente, na fabricação de concretos e argamassas. De acordo com Anuário Mineral Estadual Santa Catarina Anos Base 2017 a 2018 (BRASIL, 2019)[1], o consumo de areia, por exemplo, em Santa Catarina, tanto bruta quanto beneficiada, ultrapassou as 6.171.203 toneladas. No entanto, conforme Viacelli (2012)[2], existem dificuldades em algumas cidades ou regiões para se obter areia de qualidade, isto é, que atenda efetivamente as diretrizes normativas para seu uso em concretos e argamassas. Além

disso, cita-se também, a proibição da extração de algumas jazidas naturais, tendo em vista que a extração de areia natural traz impactos à agressivos ao meio ambiente (TEODORO, 2013)[3]. Dado esses fatores, a areia média lavada aumentou seu custo, entre os anos de 2019 e 2020, em aproximadamente 21%, valor este acima do Índice Geral de Preços de Mercado (IGP-M) (MULATO, 2020)[4].

Nesse contexto, torna-se importante pesquisar resíduos e/ou novos materiais que possam ser utilizados como agregado miúdo, como é o caso, do pó de pedra. O pó de pedra, também conhecido como areia artificial, é proveniente do beneficiamento de rochas, trata-se de um material pétreo fino gerado durante o processo de britagem (VIACELLI, 2012)[2]. Campos (2015)[5] ressalta que a utilização do pó de pedra tem base na sustentabilidade, levando em consideração que a utilização do resíduo reduz a deposição na natureza, aumenta a preservação dos corpos hídricos, além de poder conferir as construções desempenho e ter um viés econômico, já que se trata de um resíduo.

E, para implementar o uso do pó de pedra em quantidades mais expressivas, a fim de diminuir o uso de areia lavada, definiu-se, nessa pesquisa, o estudo do uso de pó de pedra para a fabricação de tubos de concreto, considerando que no Brasil os órgãos públicos optam majoritariamente pelo uso de tubos de concreto para drenagem urbana (NETO, 2008)[6]. Segundo Trentin (2014)[7], "O material concreto apresenta uma série de vantagens, como durabilidade, baixa permeabilidade, resistência às intempéries e resistência a compressão. Estas qualidades fizeram com que a sua aplicação na captação de águas pluviais fosse difundida, uma vez que os condutos geralmente são enterrados, e dessa maneira, estão sujeitos a esforços de compressão e expostos à ação da água". Os tubos de concreto, podem ser classificados quanto a seu diâmetro nominal que varia de 200 a 2000 mm em seções circulares, quanto à resistência a compressão diametral, quanto à estrutura, com ou sem reforço estrutural, e quanto ao tipo de ligação (macho/fêmea ou ponta/bolsa) segundo a ABNT NBR 8890:2020[8].

Nesse contexto, esta pesquisa tem por objetivo analisar a influência na resistência à compressão diametral e absorção de água da substituição total e parcial da areia por pó de pedra em tubos de concreto com diâmetro nominal de 400 mm.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O cimento adotado na pesquisa para a produção dos tubos foi o cimento Portland CPV ARI (Alta Resistência Inicial). Os agregados utilizados foram: areia lavada média; pó de pedra, pedrisco e brita 1. Todos os agregados passaram por ensaios de caracterização física de granulometria (NBR NM 248:2003)[9], massa específica e massa unitária (ABNT NBR NM 45:2006[10], ABNT NBR 16917: 2021[11], ABNT NBR16916: 2021[12]), conforme as normativas pertinentes. Segundo a ABNT NBR 8890:2020[8], os agregados devem atender às exigências da ABNT NBR 7211:2019[13], sendo sua dimensão máxima característica limitada ao menor valor entre um terço da espessura da parede do tubo.

Os tubos foram fabricados com o sistema macho e fêmea em uma prensa rotativa onde a intensidade da compressão é determinada pela velocidade da subida do êmbolo e a velocidade da subida do êmbolo é determinada pela adição de concreto na execução do tubo. Segundo Gimenez (2008)[14] esse processo de fabricação é o mais usual para tubos de concreto. O desforme do tubo foi realizado logo após sua confecção,

pois eles já tinham resistência para suportarem o própriopeso. O processo de cura foi realizado ao ar, em um ambiente protegido das intempéries durante três dias, de modo a evitar a ocorrência de fissuras e garantir sua capacidade resistente, como prescreve a ABNT NBR 8890:2020[8] e, posteriormente, estocados ao ar livre até completarem os 28 dias.

O traço de referência empregado na pesquisa foi estabelecido com base no traço utilizado por empresa especializada na fabricação de tubos da região do extremo sul catarinense. O traço unitário de referência foi de: 1: 4,6: 3,6: 1,8: 0,6 (cimento: areia: pedrisco: brita: água), em massa. Os percentuais de substituição da areia pelo pó de pedra foram de 25%; 50%, 75% e 100%, em relação à massa seca da areia. Como há poucas pesquisas cientificas na área de fabricação de tubos de concreto e, por conseguinte, não se encontrou estudos com substituição de areia por pó de pedra em traços de tubos, optou-se, inicialmente, por uma substituição total (100%) e por substituições fracionárias de 25%, 50% e 75%. Os traços foram codificados conforme o teor de substituição T25, T50, T75, T100 e TREF para o traço de referência – sem substituição. A Tabela 1 apresenta a quantidade de cada material para a produção de 3 tubos de concreto, de acordo com a porcentagem de substituição.

Para a execução do ensaio de compressão diametral, seguiu-se as diretrizes da ABNT NBR 8890:2020[8]. Os testes foram realizados com o uso de uma célula de carga HBM U10M com capacidade máxima de 500kN, apoiado sob um pórtico de reação. A aplicação de carga foi de 35 $kN.min^{-1}$ constantemente, portanto, não inferior a 5 $kN.min^{-1}$ e nem superior a 35 $kN.min^{-1}$, como preconiza a ABNT NBR 8890: 2020[8]. Após a ruptura do tubo, obteve-se o valor de resistência em $kN.m^{-1}$.

Materiais	TREF (kg)	T25 (kg)	T50 (kg)	T75 (kg)	T100 (kg)
Cimento Portland	50	50	50	50	50
Areia	230	172,5	115	57,5	0
Pó de Pedra	0	57,5	115	172,5	230
Pedrisco	180	180	180	180	180
Brita	90	90	90	90	90
Água	30	30	30	30	30

Tabela 1 – Quantitativo de materiais para a produção de 3 tubos de concreto

Segundo a ABNT NBR 8890: 2020[8], os tubos de concreto sem reforço estrutural podem ser classificados quanto à sua compressão diametral em: Pluvial Simples (PS) e Esgoto sanitário (ES); os pluviais ainda se subdividem em dois grupos PS1 e PS2. Os valores de carga mínima de ruptura para tubos com diâmetro nominal 400 mm, sendo para PS1: 16 kN/m, PS2: 24kN/m e ES: 36 kN/m.

O ensaio de absorção de água foi desenvolvido com base nas diretrizes do ensaio de absorção de água repassada pelo Anexo D da ABNT NBR 8890: 2020[8], sendo a absorção máxima de água em relação à sua massa seca limitada a 6% para esgoto sanitário e 8% para água pluvial. A mesma normativa indica utilizar corpos de prova

com área nominal entre 100 e 150 cm², porém utilizou-se amostras dos tubos rompidos devido à dificuldade de se cortar o concreto.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A areia possui modulo de finura igual a 3,1 e diâmetro máximo de 4,75 mm. Já, o pó de pedra tem seu módulo de finura igual a 3,0 e diâmetro máximo de 4,75 mm, classificando- os como areia grossa, segundo a classificação pertinente à ABNT NBR 7211:2019[13]. Ambos atendendoos limites da zona utilizável da ABNT NBR 7211:2019[13]. A Figura 1 representa a curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos bem como os limites da zona utilizável e zona ótima, determinada pela ABNT NBR 7211:2019[13].

Como pode ser visualizada na Figura 1, a composição granulométrica da areia atende aos limites utilizáveis pré-determinados pela ABNT NBR 7211:2019[13]. Enquanto, o pó de pedra tem excesso de grãos encontrados nas peneiras 2,36 mm e 1,18 mm totalizando 52,08% do seu material, ultrapassando o limite utilizável, e 17,45% passante na peneira 0,15 mm, sendo assim, um material com uma porcentagem de material fino maior do que o limite utilizável segundo a ABNT NBR 7211:2019[13].

Uma alta porcentagem de material fino, passante na 0,15mm, exige aumento de água de amassamento, pois a maior superfície específica desse material requer maior quantidade de água para hidratação de todos os grãos. Essa supremacia na presençade finos foi perceptível nos traços T75 e no T100. Segundo Viacelli (2012)[2] a granulometria de um agregado está diretamente ligada à qualidade do concreto, devido ao empacotamento dos grãos diminuírem vazios internos influenciando diretamente na sua resistência mecânica. Ainda, segundo o mesmo autor, concretos com agregados com módulo de finura elevado tendem a ser pouco trabalháveis, já concretos com agregados muito finos requerem uma quantidade maior de água, influenciando diretamente na sua resistência.

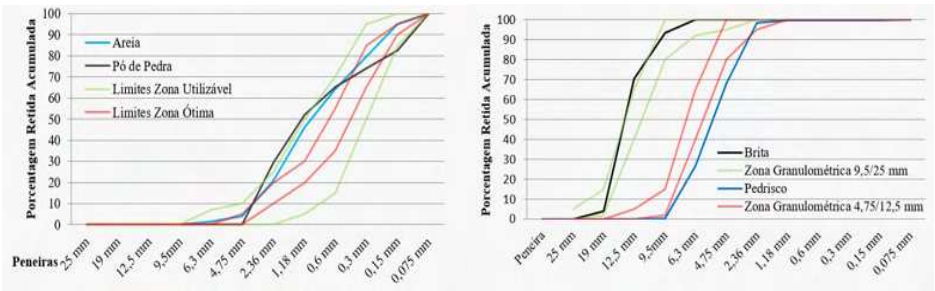


Figura 1 - Composição Granulométrica dos Agregados Miúdos e Graúdos respectivamente

Fonte: Autor

Ainda, conforme visualiza-se na Figura 1, verificou-se que o agregado pedrisco ficou fora da zona granulométrica 4,75/12,5mm dita pela norma como d/D, onde "d" é o diâmetro mínimo e "D" é o diâmetro máximo. Cabe salientar, que está é a menor

zona granulométrica encontrada na ABNT NBR 7211:2019[13].

Por meio de análise dimensional, foi verificado que o tubo de 40 cm, teve uma média de espessura de parede de 45 mm. Segundo a ABNT NBR 8890:2020[8], o diâmetro máximo do agregado se limita a um terço da espessura de parede do tubo. O diâmetro máximo encontrado na brita, não respeitou os limites de norma.

Os valores de massa unitária no estado solto verificados para a areia, pó de pedra, pedrisco e brita foram de 1.448,8 kg/m³, 1.545,0 kg/m³, 1.452,5 kg/m³, 1.510,0 kg/m³, respectivamente. Enquanto os valores de massa unitária no estado compactado foram de 1.572,5 kg/m³, 1.725,0 kg/m³, 1.563,7 kg/m³ e 1.663,7 kg/m³, na mesma sequencia elencada na frase acima. Já, os valores de massa específica verificados para a areia, pó de pedra, pedrisco e brita foram de 2.630,0 kg/m³, 2.860,0 kg/m³, 2.890,0 kg/m³, 2.920,0 kg/m³, sequencialmente.

A maior presença de finos pode gerar um menor índice de vazios aumentando sua massa unitária, porém o aumento de finos acarreta também no aumento de consumo de cimento, aumentando o custo do tubo.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão diametral dos tubos de concreto estão apresentados na Tabela 2.

Ao se analisar os valores, apresentados na Tabela 2, de média e desvio padrão, percebe-se uma diminuição da resistência a partir do T50. Ao se comparar os resultados obtidos para a resistência à compressão com os resultados de composição granulométrica dos agregados, verificou-se que, a não ser pela maior presença de finos, que a areia e o pó de pedra são similares. E, por tal motivo, justifica-se o porquê da substituição da areia lavada pelo pó de pedra não ter influenciado estatisticamente nos valores de resistência à compressão dos tubos de concreto.

TREF		T25		T50		T75		T100	
CP 01	32,90	CP 01	30,37	CP 01	35,70	CP 01	30,09	CP 01	29,03
CP 02	32,50	CP 02	37,38	CP 02	35,07	CP 02	29,57	CP 02	31,90
CP 03	33,90	CP 03	34,65	CP 03	31,55	CP 03	29,88	CP 03	29,95
CP 04	32,13	CP 04	30,26	CP 04	33,41	CP 04	32,16	CP 04	28,45
CP 05	31,65	CP 05	30,10	CP 05	31,61	CP 05	31,30	CP 05	32,45
Média	32,62	Média	32,55	Média	33,47	Média	30,60	Média	30,36
Desv. Pad	0,85	Desv. Pad	3,31	Desv. Pad	1,92	Desv. Pad	1,09	Desv. Pad	1,76

Tabela 2 – Resistência à compressão diametral (kN/m)

Analisando as médias de cada traço, verifica-se que os tubos ensaiados atenderam à resistência mínima de 16 e 24 $kN.m^{-1}$ de águas pluviais, porém nenhum traço atendeu as especificações de esgoto sanitário, prescritas na ABNT NBR 8890:2020[8].

Segundo a ABNT NBR 8890:2020[8], a absorção de água nos tubos de concreto não deve ultrapassar os 8% para condutos de águas pluviais e de 6% para condutos

de esgoto, este último mais rigoroso pelo fato de que os esgotos podem apresentar contaminantes. Somente um caso pontual no T100 não atendeu à absorção 6%. Os resultados médios de absorção de água podem ser visualizados no gráfico apresentado na Figura 2.

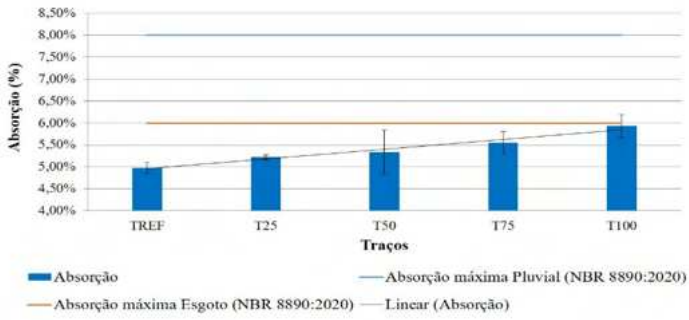


Figura 2 – Absorção de Água

Fonte: Autor

Na Figura 3 se apresenta um gráfico ao qual relaciona a compressão diametral com a absorção nos tubos de concreto. Com base na visualização percebe-se que a partir do T75 as absorções de água são maiores e as resistências de compressão diametral médias são menores.

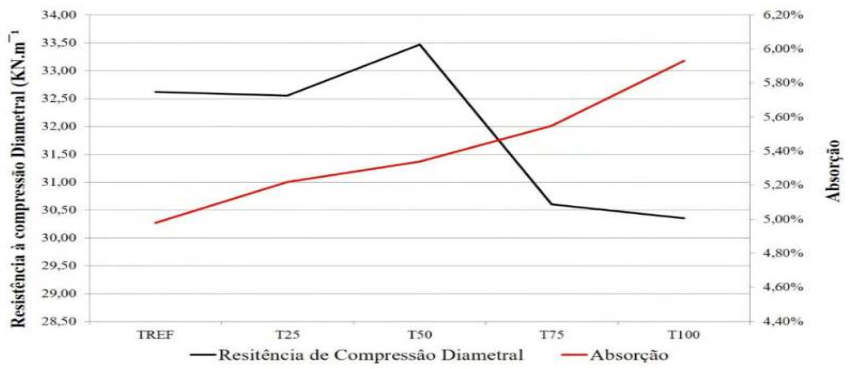


Figura 3 – Relação entre a compressão diametral e absorção

Fonte: Autor

Nota-se que à medida que foi substituindo os materiais, a absorção de água foi aumentando.

4 | CONCLUSÕES

Com base nos resultados verifica-se que a substituição da areia pelo pó de pedra nos diferentes percentuais não influenciou estatisticamente no resultado de resistência à compressão dos tubos. No entanto, ao se analisar somente os valores de média, percebe-se uma tendência de diminuição da resistência a partir do T50. A pouca distinção de resistência pode ser justificada ao fato da composição granulométrica ser similar entre os agregados empregados. A absorção de água do concreto variou à medida que o percentual de substituição da areia por pó de pedra foi aumentado, onde se observa que a substituição de 75% e 100% têm mudanças significativas em relação ao traço referência. No entanto, todos os tubos atendem a resistência mínima de 24 $kN.m^{-1}$, para condutos de águas pluviais, exigida pela ABNT NBR 8890: 2020[8], enquanto os mesmos não podem ser utilizados para esgoto sanitário. Segundo a ABNT NBR 8890: 2020[8], os tubos da pesquisa podem ser classificados como tubos de concreto de condução pluvial, classe de resistência PS2, sem reforço estrutural, diâmetro nominal (DN) 400 mm e encaixe macho/fêmea de junta rígida. (PS2 DN400 MFJR).

REFERÊNCIAS

1. Brasil. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Estadual – Santa Catarina** / Coord. Técnica de Marina Dalla Costa et al.; Equipe Técnica por Júlio César Recuero. – Brasília: ANM, 2019. 57 p.

2. VIACELLI, Luana. **Estudo da viabilidade da utilização do agregado miúdo britado em concreto convencional**. 2012. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.

3. TEODORO, S. B. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Faculdade de Engenharia da UFJF. Juiz de Fora, 2013.

4. MULATO, Y. **Custo da Construção em SP se mantém estável em dezembro**. AECweb, São Paulo, 06 de Jan. de 2020. Disponível em:< https://www.aecweb.com.br/revista/noticias/custo-da-construcao-em-sp-se-mantem-estavel- em-dezembro/19571>. Acesso em 30 de mai. de 2019.

5. CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

6. NETO, P. J. C; DEBS, M.K.E, **Manual técnico de drenagem e esgoto sanitário - Histórico e principais aplicações**. 1.ed São Paulo: Ribeirão Preto. 2008.

7. TRENTIN, T. F. S. **Análise estrutural de tubos de concreto armado com resíduo de borracha de pneu**. 2014. 104 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2014.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8890**: tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2020.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 248**: Composição granulométrica para agregados miúdos – Especificação. Rio de Janeiro, 2003

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR NM 45**: Agregados -Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

14. GIMENEZ, Arlindo, B. **Processos de Produção, Problemas e Dificuldades Encontradas na Fabricação de Tubos e Aduelas de Concreto.** In: CHAMA NETO, Pedro J. (Coord.). Manual Técnico de Drenagem e Esgoto Sanitário. 1º ed. Ribeirão Preto – SP: Associação Brasileira dos Produtores e Tubos de Concreto – ABTC, 2008.

PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO E AGREGADO POR CINZAS DE CARVÃO VAPOR

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081140

PADILHA; LILIAN[1]; PIROLLA; DOUGLAS LEFFA[2]; PIVA; JORGE HENRIQUE[3]; SAVI; ALINE EYNG[4]; WANDERLIND; AUGUSTO[5]; ANTUNES; ELAINE GUGLIELMI PAVEI[6]
[1]UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC; [2]UNESC; [3]UNESC; [4]UNESC; [5]UNESC; [6]UNESC.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ELAINEGPA@UNESC.NET

RESUMO: Nesta pesquisa avalia-se a influência da substituição simultânea de cinza leve e cinza pesada, obtidas da combustão de carvão vapor, em argamassa, sendo a cinza leve em substituição ao cimento e a cinza pesada em substituição ao agregado miúdo. A cinza leve foi dosada para teores de substituição ao cimento, em volume, de 10 e 30%. Já a cinza pesada, substituiu o agregado miúdo nas parcelas de 5 e 7%. Foram realizados ensaios de índice de consistência, resistência à tração na flexão, compressão, além da porosidade e absorção de água por capilaridade. Foi observado um aumento na resistência da argamassa quando incorporado apenas a cinza leve.

PALAVRAS-CHAVES: Material cimentício suplementar; cinza leve; cinza pesada, resíduo.

ABSTRACT: This research evaluates the influence of the simultaneous replacement of light fly ash and heavy fly ash, obtained from the combustion of steam coal, in mortar, being the light fly ash replacing the cement and the heavy fly ash replacing the fine aggregate. The light fly ash was dosed for cement replacement levels, by volume, of 10 and 30%. The heavy fly ash replaced the fine aggregate in 5 and 7%. Tests of consistency index, resistance to flexural traction, compression, porosity, and water absorption by capillarity were performed. An increase in mortar strength was observed when only light fly ash was incorporated.

KEYWORDS: Supplementary cementitious material; light fly ash; light fly ash; heavy fly ash, waste.

1 | INTRODUÇÃO

O cimento composto utilizado desde o início da década de 1950 reduziu o uso de clínquer, reduzindo assim as emissões de dióxido de carbono, reduzindo assim as emissões totais de dióxido de carbono por tonelada de cimento produzida (BATTAGIN, 2011)[(1)]. A indústria da construção civil costuma ser a maior usuária de subprodutos do carvão. São cada vez mais utilizados como aditivos de concreto para obter melhor desempenho de produtos frescos e endurecidos (POON, 1997)[(2)].

No setor de energia, o consumo mundial de carvão é de cerca de 4 bilhões de toneladas / ano, sendo produzida em média 475 milhões de toneladas / ano de cinzas de carvão. Entre eles, cerca de 150 milhões de toneladas são utilizados principalmente

para cimento (matéria-prima mista ou substitutos), agregados leves, cargas asfálticas, bases de pavimentos ou leitos de estradas, etc. (MANZ, 1995)[3].

A presente pesquisa tem como objetivo analisar as características físicas e as propriedades mecânicas de argamassa com substituição parcial, simultânea, do cimento por cinza leve e do agregado miúdo por cinza pesada.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi o CP V-ARI. O agregado miúdo trata-se de uma areia quartzosa de origem natural, utilizou-se aditivo plastificante a base de resinato de sódio. A água empregada segue as prescrições da ABNT NBR 15900-1:2009[4]. Os resíduos utilizados na pesquisa são oriundos da combustão de carvão mineral para a geração de energia elétrica de uma termelétrica da região sul do Estado de Santa Catarina. A matéria prima que deu origem a cinza leve, passou por um processo de queima em uma temperatura média de 119 ºC e foi coletada diretamente de precipitadores eletroestáticos. Já para originar a cinza pesada, o processo de queima ocorreu em temperatura média de 1100 ºC e sua coleta foi realizada propriamente das bacias de cinza.

Verificou-se a composição granulométrica da cinza pesada e do agregado miúdo conforme as diretrizes da ABNT NBR NM 248:2003[5]. O ensaio de granulometria a laser foi realizado para definição do tamanho dos grãos do cimento e da cinza leve, o equipamento utilizado para o ensaio foi o Granulômetro Cilas, modelo 1064. Realizou-se os ensaios de área específica e porosimetria, pelo método de BET (Brunauer, Emmet e Teler), para tal as amostras ficaram submersas em nitrogênio líquido durante todo o ensaio para manter a estabilidade térmica.

No estado fresco fez-se o ensaio, para a argamassa, de determinação do índice de consistência, conforme a metodologia da ABNT NBR 13276:2016([6]). Para alguns traços adicionou-se aditivo, a fim de se obter o índice de 260 mm ± 5 mm. Os ensaios para a argamassa no seu estado endurecido, foram realizados ao 28º dia após a moldagem dos corpos de prova. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão e tração na flexão, conforme as diretrizes da ABNT NBR 13276:2016[6], e utilizou-se a prensa EMIC, modelo PC200CS. O ensaio do índice de porosidade foi realizado em um Banho Dubnoff modelo 304/D, seguindo os parâmetros da ABNT NBR 9778:2005[7]. O último ensaio realizado foi o de absorção de água por capilaridade, que seguiu a ABNT NBR 15259:2005[8].

Definiu-se o traço com base no estudo elaborado por De Nes (2017)[9], adotou-se como referência o traço unitário de 1:4 (cimento : areia), em massa. A quantidade de água foi definida e fixada após o ensaio do índice de consistência, segundo as diretrizes da ABNT NBR 13276:2016[6]. Os teores de substituição de 10 e 30% para cinza leve e 5 e 7% para cinza pesada, foram determinados com base em análises de pesquisas publicadas.

A Tabela 01 indica a quantidade, em massa (kg), de cada material utilizado para produção de seus respectivos traços. O primeiro e o segundo número presentes na nomenclatura do traço, representam a porcentagem de substituição de cinza pesada e leve, respectivamente.

Traço	Cimento	Areia	**Água**	Cinza Leve	Cinza Pesada
T Ref	1,00	4,00	0,58	0,00	0,00
T 0+10	0,90	4,00	0,58	0,10	0,00
T 0+30	0,70	4,00	0,58	0,30	0,00
T 5+0	1,00	3,95	0,58	0,00	0,05
T 5+10	0,90	3,95	0,58	0,10	0,05
T 5+30	0,70	3,95	0,58	0,30	0,05
T 7+0	1,00	3,93	0,58	0,00	0,07
T 7+10	0,90	3,93	0,58	0,10	0,07
T 7+30	0,70	3,93	0,58	0,30	0,07

Tabela 1 – Composição das misturas de argamassa

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme ensaio granulométrico, o agregado possui módulo de finura de 2,37 e diâmetro máximo característico de 2,4 mm. Já, a cinza pesada, apresenta diâmetro máximo de 12,5 mm e módulo de finura de 2,65. A Figura 01 apresenta os limites da curva granulométrica da areia, da cinza pesada e das zonas utilizáveis inferior e superior, conforme repassada pela ABNT NBR 7211:2009[10].

De acordo com a Figura 01, pode-se observar que a distribuição granulométrica do resíduo, cinza pesada e da areia, atendem em sua maioria os limites da zona utilizável.

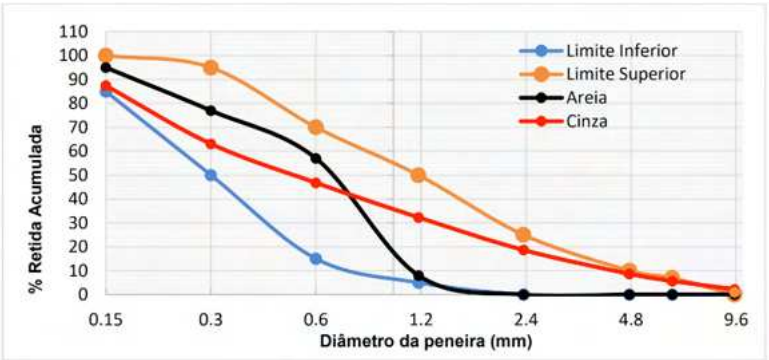


Figura 01 - Classificação das zonas, conforme NBR 7211:2009

Fonte: Autor

A Figura 02 apresenta os resultados da granulometria a laser realizada para a cinza leve. A ABNT NBR 12653:2014[11] determina que, para ser considerado um material pozolânico, a quantidade máxima de material retido na peneira 45µm deve ser de 20%. Com a análise da composição granulométrica obteve-se os valores de diâmetros efetivos

passantes nas peneiras, onde 10% das partículas possuíam granulometria inferior a 3,71 µm, 50% inferior a 24,93 µm, 90% inferior a 67,07 µm e o diâmetro médio de 31,12 µm.

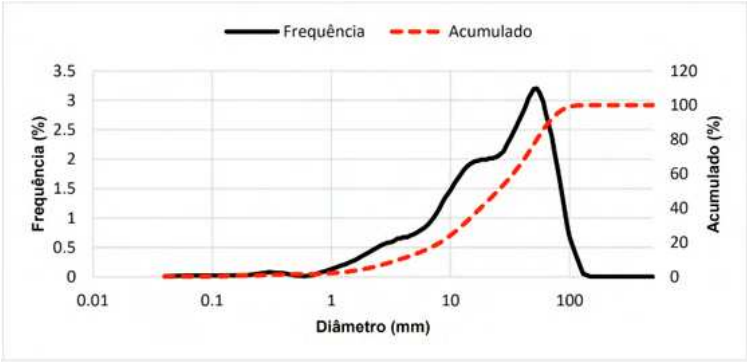


Figura 02 - Curva de distribuição dos tamanhos das partículas - cinza leve intrínseca

Fonte: Autor

Com o ensaio de área superficial específica – BET, obteve-se os resultados de 1,446 m²/g e 5,468 m²/g, para cimento e cinza leve, respectivamente. Através do ensaio de VTP (Porosimetria), observou-se que o volume total de poros presentes no cimento Portland CP V-ARI é inferior ao apresentado na cinza leve, pois o resultado do ensaio foi de 0,008356 cc/g para o cimento e 0,01378 cc/g para a cinza leve, ambos a P/P_0 de 0,978. A Tabela 02 apresenta a composição final dos traços.

Traço	Cimento	Areia	Água	Cinza Leve	Cinza Pesada	Aditivo (%)	Índice de Consistência (mm)
T Ref	1,00	4,00	0,58	0,00	0,00	0	265
T 0+10	0,90	4,00	0,58	0,10	0,00	0	255
T 0+30	0,70	4,00	0,58	0,30	0,00	0	264
T 5+0	1,00	3,95	0,58	0,00	0,05	0,0038	257
T 5+10	0,90	3,95	0,58	0,10	0,05	0,0038	264
T 5+30	0,70	3,95	0,58	0,30	0,05	0,0100	257
T 7+0	1,00	3,93	0,58	0,00	0,07	0,0053	260
T 7+10	0,90	3,93	0,58	0,10	0,07	0,0099	256
T 7+30	0,70	3,93	0,58	0,30	0,07	0,0011	256

Tabela 02 - Composição final das misturas de argamassa

Fonte: Autor

Os resultados de área específica do cimento e cinza leve, BET, indicam uma necessidade das argamassas, que continham maiores percentuais de substituição do

cimento por cinza leve, por maior quantidade de aditivo para manter-se a consistência, uma vez que, quanto maior a área específica, menor o diâmetro dos grãos e, portanto, maior a quantidade de água necessária para homogeneizar todos os grãos. No entanto, tal fato não foi verificado com efetividade, como por exemplo, citam-se o T Ref, T 0+10 e o T 0+30 em que se alterou o percentual de substituição do cimento por cinza leve e, mesmo assim, não houve a necessidade de adicionar-se aditivo plastificante para manter-se a consistência. Fato similar ocorreu com o ensaio de porosimetria do cimento e da cinza leve, pois a cinza leve, apresentou maior porosidade, entretanto, essa porosidade não ocasionou maior demanda por aditivo. Fato semelhante, ocorre com as substituições do agregado miúdo, areia, pela cinza pesada. Apesar da cinza pesada apresentar grãos maiores que a areia, os traços de argamassa com maior percentual de substituição da areia pela cinza pesada demandaram de maior quantidade de aditivo para manter-se a consistência.

A Tabela 03 apresenta os resultados acerca os ensaios da argamassa no estado endurecido, capilaridade, coeficiente de capilaridade, resistência à compressão e tração na flexão, com seus respectivos desvios padrões.

Quanto menor o coeficiente de capilaridade, menos água a argamassa irá absorver, característica positiva para as argamassas, principalmente, porque trata-se de uma prescrição para ter-se maior durabilidade. No ensaio de absorção de água por capilaridade verificou-se que os traços com inserção da cinza pesada se mostraram os com maior absorção de água por capilaridade. A mistura T0+10, apresentou o melhor resultado para o ensaio de porosidade, ou seja, possui poucos vazios para percolação de água, promovendo assim, um bom desempenho quando se tratar de infiltrações, entre outras patologias. Esse traço foi também o que apresentou maior densidade de massa, corroborando assim com o resultado de porosidade.

Visto que quanto menor o coeficiente de capilaridade, menos água o material cimentício irá absorver, para o ensaio de absorção de água por capilaridade o traço T0+10, mistura que obteve maior resistência à tração na flexão e compressão.

Traço	Coeficiente de apilaridade ($g/dm^2.min^{1/2}$)	Porosidade (%)	Compressão (MPa)	Desvio Padrão	Tração na Flexão (MPa)	Desvio Padrão
Ref	0,152	7,35	23,95	1,430	5,69	0,41
T 0+10	0,117	4,51	33,52	1,730	7,50	0,50
T 0+30	0,158	4,99	26,56	1,700	5,69	0,25
T 5+0	0,121	8,38	19,78	2,090	6,07	0,75
T 5+10	0,152	6,96	18,48	2,040	5,14	0,66
T 5+30	0,215	6,02	13,71	0,960	3,61	0,16
T 7+0	0,134	9,34	14,63	0,730	4,05	0,41
T 7+10	0,085	10,97	12,9	0,880	4,27	0,16
T 7+30	0,135	7,22	14,82	0,760	4,32	0,34

Tabela 03 - Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, porosidade, compressão e tração na flexão

Fonte: Autor

A mistura T0+10, apresentou o menor resultado para o ensaio de porosidade. O que significa que além de ter alta resistência, possui poucos vazios para percolação de água, promovendo assim, provavelmente, um bom desempenho quando se tratar de infiltrações, entre outras patologias.

O ensaio de resistência a tração na flexão, apontou um ganho de resistência de 39,96% no traço T0+10 e 10,90% no traço T0+30. Mesmo com o aumento da resistência à tração na flexão, a análise estatística mostra que o limite superior do traço referência, encontra-se dentro do desvio padrão do traço T0+30. Esta verificação demonstrou uma grande variância com demais traços, uma vez que tiveram queda significativa na resistência a compressão, ficando com valores semelhantes uns aos outros. Os melhores resultados de resistência a compressão se deram nas porcentagens de 10 e 30% de substituição, o que demonstra um resultado positivo, sendo que 10 e 30% do cimento foi substituído pelo resíduo cinza leve. A substituição influenciou também no ganho e perda de resistência à tração na flexão, das misturas em que foram realizadas as substituições, quatro apresentaram um resultado positivo quanto a esta propriedade mecânica. Os traços T0+10 e T5+0, obtiverem um ganho na resistência de 31,71 e 6,71%, respectivamente. O traço T0+30 igualou a resistência da tração na flexão do traço referência. Já a mistura T5+10, obteve uma perda na resistência média. As melhores combinações de teores de substituição para resistência a flexão são 0% de cinza pesada e 10% de cinza leve, e, 5% de cinza pesada e 0% de cinza leve.

4 | CONCLUSÕES

Conclui-se que a incorporação de cinza leve possui um grande potencial de substituição de cimento Portland em argamassas. A incorporação da cinza nas misturas de argamassa nas parcelas de 10 e 30% promoveu um aumento nas resistências à compressão e tração na flexão. O resíduo analisado nesse artigo tem potencialidade para ser utilizado como material cimentício suplementar.

A cinza pesada, mesmo com características físicas consideradas adequadas, quando utilizada na argamassa não alcançou a eficiência esperada, pois houve redução da resistência do material. No entanto, cabe salientar, que de acordo com o uso das argamassas, seja assentamento e/ou revestimento, nem sempre se necessita de elevadas propriedades mecânicas. E, portanto, deve ser analisada outras características físicas em conjunto com as propriedades mecânicas. Verificou-se, também que a combinação da substituição dos dois resíduos não funcionou com eficácia comparado ao traço referência.

Avaliando de forma conjunta os resultados, nota-se que se obteve bons resultados com as substituições, analisando que se retirou grande parte do material originalmente utilizada na produção das argamassas.

REFERÊNCIAS

1. A.F. BATTAGIN, Cimento Portland, In: G. C., ISAIA (Ed.), **Concreto: ciência e tecnologia**, Inst. Brasil. Concr., S. Paulo/SP (2011) 185-232.

2. POON, C. S., WONG Y. L., LAM, L. **The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars**. Construction and Building Materials, Vol. 11. Great Britain, p.383-393, 1997.

3. MANZ, O. E**. Worldwide Production of Coal Ash and Utilization in Concrete and Other Products**, In: 1995 INTERNATIONAL ASH UTILIZATIONS SYMPOSIUM, Lexington, Nov., 1985. Anais... Lexington, University of Kentucky Center for Applied Energy Research and the Journal FUEL. Iv., 5p.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

8. 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. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

9. DE NES, Gabriel Furlanetto. **Análise da influência da substituição parcial do cimento portland por resíduo de rocha ornamental em argamassa**. 2017. Artigo (Curso de Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 10 p.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NA RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO AXIAL DE ARGAMASSAS MISTAS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081141

SCHILLER; ANA PAULA STURBELLE[1]; PALIGA; CHARLEI MARCELO[1]; TORRES; ARIELA DA SILVA[1]
[1] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS.
ENG.ANAPSCHILLER@GMAIL.COM

RESUMO: Considerando o volume de resíduos gerados pelo setor da construção civil, o objetivo deste trabalho foi verificar a variação da resistência mecânica à compressão axial, em argamassas mistas, com substituição parcial do cimento por Resíduo de Construção e Demolição (RCD) e Resíduo da Industria de Pré-moldado (RIPM). A argamassa de referência foi confeccionada com o traço 1:2:8 e as substituições aconteceram nos teores de 5, 10 e 15%. Os resultados mostraram desempenho satisfatório entre as misturas confeccionadas com RCD, visto que aos 63 dias os três teores de substituição deste resíduo tornaram-se estatisticamente iguais ao traço de referência.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduos de construção civil, resistência à compressão axial, argamassa mista, tecnologia da arquitetura.

ABSTRACT: Considering the volume of waste generated by the construction sector, the objective of this work was to verify the variation of mechanical resistance to axial compression in mixed mortars, with partial replacement of cement by Construction and Demolition Residue (RCD) and Precast Industry Residue (RIPM). The reference mortar was made with the trace 1:2:8 and the substitutions occurred at the levels of 5, 10 and 15%. The results showed satisfactory performance among the mixtures made with RCD, since at 63 days the three replacement levels of this residue became statistically equal to the reference trait.

KEYWORDS: Civil construction waste, axial compression resistance, mixed mortar, architecture technology.

1 | INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é uma importante atividade que traz benefícios para o desenvolvimento econômico e social do país. Em contrapartida, é um setor altamente degradante, e os impactos ambientais causados podem ser observados em todas as etapas de sua cadeia produtiva (LARUCCIA(1)).

De acordo com Valporto e Azevedo(2), o esgotamento de jazidas pela extração de matérias-primas, a emissão de gases poluentes, o gasto de energia para extração, a fabricação e transporte dos recursos naturais e a contaminação da água por processos industriais são alguns dos impactos ambientais causados pela construção civil.

Além dos impactos mencionados provenientes da extração e beneficiamento da matéria-prima, a construção civil também é responsável pela geração de grande

quantidade de resíduos sólidos urbanos. No ano de 2019, foram coletadas no Brasil 72,7 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo que, aproximadamente 61% deste total foram resíduos provenientes da construção civil, segundo o panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE[3].

Assim, com o intuito de reduzir os impactos ambientais gerados pela construção civil nos últimos anos, vem crescendo a preocupação quanto à disposição final dos resíduos gerados pelo setor. A incorporação deles como matéria-prima para a produção de argamassas é uma alternativa para a minimização dos impactos no meio ambiente.

No estudo de Canova[4], o autor testou a influência da substituição do cimento por finos de britagem em argamassas confeccionadas com traço 1:1,5:9 (cimento, cal e areia), em volume. Foram testados os teores de substituição de 2,5, 5, 10, 15 e 20%, em massa, e as misturas foram ensaiadas no estado fresco e endurecido. Os resultados indicam a viabilidade da substituição dos teores de 5 e 10% do cimento por resíduos de finos de britagem.

Knob et al.[5] estudaram a substituição do agregado miúdo natural utilizado na confecção de argamassas de revestimento por resíduos de construção civil em porcentagens de 5, 25 e 50%. As argamassas recicladas foram comparadas ao traço de referência, confeccionado nas proporções em massa de 1:1:6 (cimento, cal e areia). Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, que viabilizaram a utilização dos resíduos para a produção de argamassas de revestimento.

Já Pinz[6] estudou o efeito da substituição do cimento e do agregado por resíduos de cerâmica vermelha (RCV) em dois tipos de argamassas, hidráulica e mista, confeccionadas com traço em massa de 1:6 e 1:2:8, respectivamente. Foram testados os teores de substituição de 5, 10 e 15% do aglomerante, e de 10, 15 e 20% do agregado, ambos em relação à massa. Os resultados mostraram melhoramento da resistência mecânica das argamassas hidráulicas com substituição do aglomerante nos teores de 5 e 15%.

Desta forma, considerando a relevância do tema, este trabalho tem como objetivo verificar a influência na resistência à compressão axial de argamassas mistas de cimento e cal, a partir da substituição parcial do cimento por dois resíduos de construção civil, sendo eles: Resíduo de Construção e Demolição (RCD), proveniente da demolição de um prédio industrial, e Resíduo da Industria de Pré-moldado (RIPM), derivado de uma fábrica de artefatos cimentícios, ambos os resíduos foram coletados na cidade de Pelotas/RS.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para confecção das argamassas de revestimento foram cimento Portland CP IV 32, sendo comumente utilizado em obras da região sul do estado do Rio Grande do Sul, com massa específica de 2,77 g/cm³, cal hidratada de classe CH - II, areia média quartzosa lavada com massa específica de 2,41 g/cm³ e módulo de finura de 2,79, e água proveniente da Companhia Rio-grandense de Saneamento – CORSAN, companhia que fornece água para a cidade de Jaguarão/RS.

Já os resíduos empregados foram coletados em dois locais distintos da cidade de Pelotas/RS, sendo o primeiro material oriundo da demolição de um prédio industrial (RCD) e o segundo material foi coletado em uma indústria de artefatos cimentícios (RIPM). Nos locais das coletas, os resíduos foram retirados em quatro pontos distintos, e em cada um desses pontos retirou-se material em três alturas diferentes, sendo a camada inferior do ponto de coleta com distância superior a 20 cm do solo para evitar contaminação do material.

O primeiro material coletado (RCD) apresentava característica mista, com restos de material cerâmico, concreto, argamassa, madeira e aço. Desta forma, no ambiente de laboratório, esse resíduo passou por uma seleção visual, separando apenas fragmentos de concreto e argamassa.

Posteriormente, com finalidade de reduzir a granulometria das partículas e tornar possível a aplicação em argamassas, ambos os resíduos foram beneficiados em britador de mandíbulas verticais (MARCONI, modelo MA 2015) e, passaram por ensaios de caracterização seguindo as recomendações das normas vigentes da ABNT. Os resultados dos ensaios de caracterização física dos resíduos são apresentados na Tabela 1.

Parâmetros físicos	RCD	RIPM
Massa específica (NBR NM 52/2009)	2,51 g/cm³	2,33 g/cm³
Massa unitária solta (NBR NM 45/2006)	1,46 g/cm³	1,56 g/cm³
Índice de volume de vazios (NBR NM 45/2006)	30,5%	25,4%
Absorção (NBR NM 30/2001)	8%	4,7%

Tabela 1 – Parâmetros físicos dos resíduos

Para garantir maior homogeneidade dos resíduos, estes foram selecionados apenas os materiais que passaram na peneira 0,15mm e ficaram retidos na peneira 45μm.

2.2 Método

A definição do traço para a moldagem dos corpos de prova levou em consideração o estudo de Pinz[6], tendo sido usado como traço de referência a proporção em massa de 1:2:8 (cimento, cal e areia), e substituição em relação a massa do cimento por resíduos nos teores de 5, 10 e 15%.

Os corpos de prova foram moldados nas instalações do laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos do IFSul, Câmpus Avançado Jaguarão. Inicialmente, tanto os resíduos quanto a areia foram previamente mantidos em estufa por 24h, de forma que a umidade fosse eliminada. O preparo da argamassa seguiu os procedimentos de execução prescritos na NBR 13276[7], com auxílio de uma argamassadeira automática de movimento planetário de duas velocidades (PROJETEST).

A quantidade de água necessária para o amassamento foi definida a partir do índice de consistência de 260 mm ± 5 mm, variando o consumo de água de acordo com

a necessidade de cada traço para atender o parâmetro e garantir a mesma fluidez entre as misturas. A Tabela 2 apresenta o índice de consistência e a relação água aglomerante para cada uma das misturas analisadas.

Traço	Teor de substituição (%)	Relação água / aglomerante	Índice de consistência
REF	0%	0,74	255
RCD 5%	5%	0,70	262
RCD 10%	10%	0,71	265
RCD 15%	15%	0,72	260
RIPM 5%	5%	0,72	265
RIPM 10%	10%	0,71	260
RIPM 15%	15%	0,73	265

Tabela 2 – Relação água aglomerante e índice de consistência

A moldagem dos corpos de prova foi feita logo após a verificação do índice de consistência, e seguiu as recomendações da NBR 7215[8]. Para isso, foram utilizados moldes metálicos cilíndricos, com as dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Foram moldados ao total quatro corpos de prova cilíndricos para cada idade e para cada traço de argamassa, totalizando 84 unidades.

Com objetivo de comparar a influência dos resíduos nas argamassas, os corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência à compressão axial aos 7, 28 e 63 dias, seguindo as especificações da norma NBR 7215[8]. O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas da UFPEL com auxílio de uma prensa eletro hidráulica (Forney, modelo F-25 EX-F-CPILOT).

Após a execução do ensaio, os resultados passaram pela análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%. Essa análise permite verificar a existência de diferenças significativas entre os grupos avaliados, no entanto, não identifica quais e quantas amostras são diferentes. Para identificar as médias diferentes, realizou-se o teste de Tukey com intervalo de confiança de 95%. Com base nesses resultados pôde-se determinar o melhor teor de substituição.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 63 dias podem ser verificados na Figura 1. Com base nestes dados, verifica-se que as argamassas com resíduos apresentaram menor resistência à compressão axial que o traço de referência. Esse fato pode ser atribuído a menor quantidade de ligante entre as partículas, resultante da substituição do cimento por resíduos nas misturas. Entre as argamassas que utilizaram resíduos em sua confecção, percebe-se que aquelas com o RIPM obtiveram valores de resistência mais elevados, sendo o teor de substituição de 10% aquele que apresentou maior resistência.

Aos 28 dias, nota-se um expressivo ganho de resistência em todos os traços em decorrência da hidratação do silicato tricálcico, componente químico presente no cimento. Observa-se nessa idade que o melhor desempenho entre as amostras foi registrado pelo traço RCD 5%, que ultrapassou em 1,4% a resistência do traço de referência. Este ganho de resistência pode estar atrelado ao preenchimento dos vazios pelas finas partículas do resíduo RCD. No estudo realizado por Carasek et al.[9], os autores verificaram que o formato e o tamanho das partículas presentes nas argamassas proporcionam o empacotamento granulométrico, reduzindo os espaços vazios entre os grãos e aumentando o índice de consistência das misturas. Observa-se que a argamassa confeccionada com substituição de 5% do cimento por RCD apresentou um comportamento similar ao do estudo citado, onde necessitou-se uma menor quantidade de água para atender o parâmetro de consistência estipulado pela NBR 13276[7], em virtude do fechamento dos vazios da mistura.

Já aos 63 dias, observa-se um comportamento semelhante, onde o traço RCD 5% apresentou resistência 3,3% maior que o traço de referência. Nota-se nesta idade que as argamassas confeccionadas com RCD apresentaram os maiores ganhos de resistência entre as argamassas com resíduos. Entre o grupo de argamassa que utilizou RIPM em sua composição, observa-se que o traço RIPM 5% presentou o maior valor de resistência, e os traços RIPM 10% e RIPM 15% apresentaram redução de resistência de 0,5% e 5%, respectivamente.

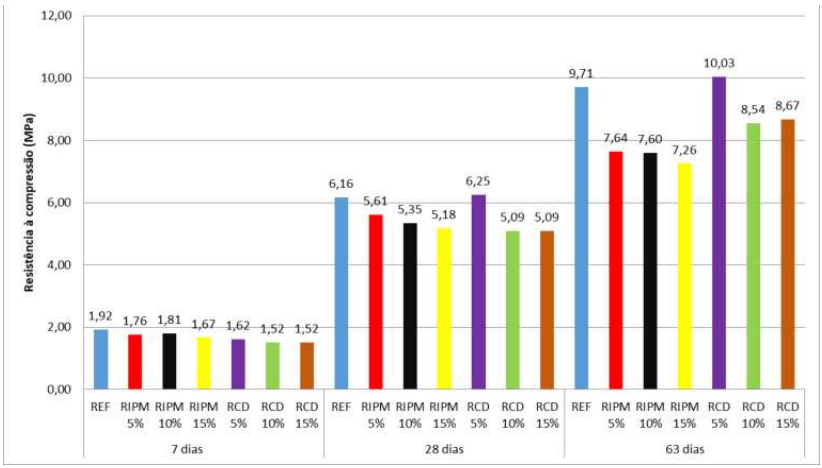


Figura 1 - Resultado de resistência à compressão

Fonte: Autores

Posteriormente, realizou-se a análise de variância (ANOVA) que constatou a significância estatística das variáveis relacionadas, sendo elas o teor de substituição e idade das amostras. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 3.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Traços	18,17773046	6	3,029621743	12,90969298	1,87E-09	2,246407983
Idades	652,6098645	2	326,3049322	1390,436447	7,6E-53	3,142808517
Interações	16,03332878	12	1,336110732	5,693377193	1,6E-06	1,909325452
Dentro	14,78471797	63	0,234678063			
Total	701,6056417	83				

Tabela 3 – Anova ensaio de resistência à compressão

A análise de variância indicou a existência de pelo menos uma diferença significativa entre as médias. Desta forma, para identificar estas diferenças, realizou-se o teste de Tukey com um nível de confiabilidade de 95%.

Aos 7 dias, a comparação entre os grupos REF e RIPM apontou diferença significativa entre os traços REF e RIPM 15% e entre os grupos REF e RCD todos os traços de substituição demonstraram diferenças significativas. A análise entre os grupos RIPM e RCD verificou diferenças significativas para as comparações RIPM 5% e RCD 10%; RIPM 5% e RCD 15%; RIPM 10% e RCD 10% e; RIPM 10% e RCD 15%.

Aos 28 dias, os resultados demonstram que há diferença significativa entre o REF e o RCD nas seguintes aferições REF e RCD 10% e REF e RCD 15%. As comparações dentro do grupo de argamassas com RCD em sua composição demonstraram diferença significativa do RCD 5% quando comparado ao RCD 10% e RCD 15%. Entre os grupos que utilizaram resíduos em sua composição, constatou-se que apenas a comparação do RIPM 15% com o RCD 5% apresentou diferença significativa, o que indica que os demais traços apresentam estatisticamente a mesma resistência. O mesmo ocorre com o grupo de argamassas com RIPM em sua composição quando comparado com o traço de referência.

Por fim, aos 63 dias, a análise de Tukey indicou a existência de diferença significativa entre os grupos REF e RIPM para todos os teores de substituição. Já entre os grupos RCD e RIPM verificou-se desigualdade para as aferições entre RIPM 10% e RCD 5% e RIPM 15% e RCD 5%. Observa-se que, o grupo de argamassas que utilizou RCD em sua composição apresentou estatisticamente a mesma resistência daquelas do grupo de referência.

Seguindo os critérios da NBR 13281(10), as argamassas REF e RCD 5% podem ser classificadas na Classe P5 (5,5 a 9,0 MPa). Já os traços RCD 10%; RCD 15%; RIPM 5%; RIPM 10% e; RIPM 15% são classificados como classe P4 (4,0 a 6,5 MPa). Cabe destacar que, apesar de a norma categorizar as argamassas de acordo com a resistência, ela não faz especificações quanto ao local de aplicação de cada uma das classes.

4 | CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, pode-se concluir que embora inicialmente a incorporação do RCD tenha proporcionado a redução da resistência à compressão axial das argamassas, ao longo do tempo essa diferença foi reduzindo, e aos 63 dias os teores

de substituição tornaram-se estatisticamente iguais ao traço de referência. Com relação ao RIPM, verifica-se que a resistência inicial dos teores de substituição de 5 e 10% foram estatisticamente iguais ao traço de referência, entretanto aos 63 dias nota-se que o resíduo apresentou resistência inferior ao traço de referência em todos os teores de substituição. Portanto, conclui-se que a utilização do RCD como substituinte parcial do cimento é uma alternativa viável, pois propicia a confecção de argamassas alternativas com a mesma resistência à compressão que a argamassa de referência.

REFERÊNCIAS

1. LARUCCIA, M.M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **ENIAC Pesquisa,** v. 3, n. 1, p. 69-84, Guarulhos, jan.-jun. 2014.

2. VALPORTO, M.S.; AZEVEDO, S. Gestão do design na identificação dos fatores de impactos ambientais da construção civil. **Estudos em Design**, v. 24, n. 1, p. 124-151, Rio de Janeiro, 2016.

3. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE.** Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2020. Disponível em: https://abrelpe.org.br/panorama/. Acessado em: 13/05/2021.

4. CANOVA, J. A. Substituição do cimento por finos de britagem em argamassa de revestimento. **Ciência & Engenharia,** v. 26, p. 11-26, Uberlândia, jul/dez 2017.

5. KNOB, G. P. L. et al. Viabilidade Técnica da utilização do resíduo da construção civil para a produção de argamassa de revestimento. In: **Anais Engenharia civil UCEFF,** v. 3, n.1, 2019/1.

6. PINZ, F. P. **Influência do resíduo de cerâmica vermelha em argamassas na substituição parcial do agregado ou do cimento.** 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

7. 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, 2016.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

9. CARASEK, H. et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria,** v.21, n.3, p. 714 –732 , 2016.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.



CAPÍTULO 42

PAINÉIS AGLOMERADOS HOMOGÊNEOS DE MADEIRA PRODUZIDOS COM PINUS, PALHA DE MILHO, POLIETILENO TEREFTALATO E POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081142

SOUZA; MATHEUS [1]; CAZELLA; PEDRO H. S. [1]; RODRIGUES; FELIPE R.[1]; PEROSSO; MARJORIE B. S.[1]; SILVA; SÉRGIO A. M.[1]
[1]UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" – UNESP.
EMAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MV.SOUZA@UNESP.BR

RESUMO: Este estudo se constituiu da produção de painéis aglomerados homogêneos de madeira com pinus, densidade nominal de 650 kgf/m³, palha de milho, polietileno tereftalato e adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona. Propôs-se misturas de pinus com palha de 85-15%, 70-30%, 50-50%, 30-70% e 100% de palha e pinus, considerando-se a adição de 10% de polietileno tereftalato e poliuretano derivado de óleo de mamona sendo prensados com 50kgf/cm², 110⁰C em 10min, objetivando-se melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, que foram avaliadas utilizando-se a NBR14810:1;2/2018. Os resultados obtidos indicaram a possibilidades de uso dos painéis na construção civil e empresas moveleiras.

PALAVRAS-CHAVES: Painéis aglomerados Homogêneos, Palha de milho, Polietileno Tereftalato e Adesivo Poliuretano derivado de Óleo de Mamona.

ABSTRACT: This study consisted of the production of homogeneous particleboard with pine, nominal density of 650 kgf/m³, corn straw, polyethylene terephthalate and polyurethane adhesive derived from castor oil. Mixtures of pine with straw of 85-15%, 70-30%, 50-50%, 30-70% and 100% of straw and pine were proposed, considering the addition of 10% polyethylene terephthalate and polyurethane derivative of castor oil being pressed with 50kgf/cm2, 110℃ in 10min, aiming to improve its physical and mechanical properties, which were evaluated using NBR14810:1;2/2018. The results obtained indicated the possibilities of using the panels in civil construction and furniture companies.

KEYWORDS: Homogeneous Particleboard, Corn Straw, Polyethylene Terephthalate and Polyurethane Adhesive derived from Castor Oil.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo país com a maior área de florestas do mundo, correspondendo cerca de 493,5 milhões de hectares compostos por florestas nativas e plantadas (SNIF, 2016)(1). De acordo com Buzo & Silva (2018)(2), o frequente uso de madeiras nativas promoveu exploração indiscriminada das florestas naturais, prejudicando a sustentabilidade para futuras gerações e para o meio ambiente.

A escassez de espécies de árvores nativas no Brasil tem justificado pesquisas que visam utilizar resíduos agroindustriais (VISNARDI, 2010)(3). Uma alternativa é o aproveitamento de madeiras de dimensões e/ou qualidades inferiores para a produção

de painéis aglomerados (GUIMARÃES JÚNIOR, 2008)[4].

O Milho (*Zea Mays L.*) é um alimento cultivado em todos os continentes, originário das américas, sua produção só perde para o arroz e o trigo (CASTRO, G. S. A. *et al*)[5]. Atualmente é 15% consumido pela indústria alimentícia e na produção de elementos colantes, espessantes e óleos e,85% para alimentação animal. Na Europa e Estados Unidos ele é utilizado para a produção de etanol (CASTRO, G. S. A. *et al*)[5]. Entre 2019/2020 o Brasil teve cerca de 18.527,3 mil ha de área plantada, tendo previsão para 2020/2021 de 19.717, 5 mil ha, mostrando assim um cultivo de grande potencial econômico (CONAB, 2021)[6].

A utilização de compósitos lignocelulósicos nas indústrias de polímeros têm se tornado frequente devido ao seu reforço em matrizes poliméricas. E a utilização de plásticos, devido ao seu poder poluidor em função do longo período de degradação, tem sido frequentemente reutilizado em larga escala para várias aplicações (CATTO, *et* all., 2014)[7].

Segundo estudos de Sugahara & Silva (2018)[8] o óleo de mamona possibilita a produção de um adesivo poliuretano bi-componente, ou seja, uma parte composta de óleo de mamona (poliol) e a outra desenvolvida com derivados do petróleo (pré-polímero). O PU-Mamona é um adesivo biodegradável e sustentável, que vem sendo utilizado em pesquisas para produção de painéis derivados de madeira.

Considerando a possibilidade de uso da madeira de pinus em misturas com palha de milho e polietileno tereftalato (PET) em diferentes proporções, esse trabalho produziu e avaliou painéis aglomerados empregando como aglutinante o adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona, com o objetivo de melhor as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo foram adquiridas tábuas de Pinus *ellioti* e palha de milho no comércio local de Ilha Solteira. As partículas de polietileno tereftalato foi fornecido pela Global PET SA, localizada no município de São Carlos-SP e o adeviso de Poliuretana derivado do óleo de mamona foi fornecida pela empresa Imperveg® no município de Aguaí-SP, Brasil.

2.1 Preparação dos materiais para produção dos painéis

Para produção dos painéis, inicialmente as tábuas de pinus foram processadas em plaina desengrossadeira e transformadas em maravalhas, em seguida, utilizando-se um moinho de facas e peneira com abertura 12mm, foram obtidas as partículas de pinus.

As partículas de pinus obtidas foram separadas inicialmente em peneirador elétrico com peneiras com de aberturas entre 6 a 1,18mm e, em seguida, com base na NBR14810 1-2/2018[9-10], foram colocadas em estufa à temperatura de 105°C ± 3°C, até atingirem umidade inferior a 5%.

As palhas de milho foram adquiridas verdes e deixadas por dois dias secando ao sol com o objetivo de diminuir a umidade antes de serem trituradas. Após avaliar visualmente que as palhas haviam perdido umidade, passando da coloração verde para

amarela, foram submetidas ao mesmo processo de trituração das maravalhas de pinus.

Com relação ao PET foram utilizadas partículas de dimensões irregulares e que possuíam comprimento médio de aproximado de 2,36mm. Esse material, após aferição da umidade, verificou-se que se apresentavam com 0% de umidade.

Foram realizados ensaios para determinação da composição granulométrica das misturas das partículas utilizando-se um método adaptado com base na ABNT (1997b; 2003)[11], objetivando-se calcular a porcentagem da massa retida e acumulada em cada peneira e determinar o módulo de finura das partículas.

2.2 Produção dos painéis

Para produção dos painéis foram elaboradas 07 misturas com diferentes proporções de partículas de pinus e palha de milho, conforme apresentado na Tabela 1.

Nomenclatura	% de Pinus	% de Palha de Milho	% de PET	% de PU
MISTURA 1	100 %	0 %	0%	10%
MISTURA 2	100%	0%	10%	10%
MISTURA 3	85%	15%	10%	10%
MISTURA 4	70%	30%	10%	10%
MISTURA 5	50%	50%	10%	10%
MISTURA 6	30%	70%	10%	10%
MISTURA 7	0%	100%	10%	10%

Tabela 1 – Proporções e misturas dos materiais

Utilizando-se das misturas propostas, foram produzidos painéis homogêneos com densidade nominal de 650 kg/m³ empregando-se 10% da massa seca de partículas em adesivo PU-Mamona, que por se constituir de dois componentes, a homogeneização do adesivo nas partículas foi realizada adicionando-se inicialmente o poliol e em seguida o pré-polímero em intervalos de homogeneização de 5 min.

Os painéis foram prensados com força de 50kg/cm² e temperatura de 110°C, sendo utilizados 5 minutos de prensagem com um intervalo de 30 segundos para a liberação dos gases, seguidos de mais 5 minutos para finalização da prensagem do painel. Após prensagem, os painéis foram submetidos ao um período mínimo de 72h para estabilização de cura do adesivo em condições normais de temperatura e pressão.

Em seguida foram refiladas as bordas dos painéis para remoção da região que não obteve compactação adequada e para definir dimensões 35x35cm, objetivando a preparação dos corpos-de-prova para realização de ensaios de resistência à Flexão Estática e Tração Perpendicular, com base na NBR 14.810- 1 e 2 (2018)[9-10].

Para avaliação dos painéis, inicialmente foram realizados os ensaios para avaliação das propriedades mecânicas Flexão Estática, Modulo de Elasticidade e Tração Perpendicular, em seguida os ensaios para avaliação das propriedades físicas Densidade, Umidade, Inchamento e Absorção de umidade em 24h.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Determinação da composição granulométrica das misturas

Na Tabela 2 observa-se que a maior quantidade de partículas de pinus, palha milho e PET se concentram nas peneiras com malhas entre 2,360 à 0,590mm.

		PINUS		PALHA DE MILHO		PET	
Peneira		Massa (g)	Retido %	Massa (g)	Retido %	Massa (g)	Retido %
N°	Malha (mm)						
1/4"	6,300	0,00	0,00%	0,09	0,26%	0,00	0,00%
4	4,750	1,50	4,23%	1,03	2,93%	0,00	0,00%
8	2,360	20,30	57,22%	11,31	32,19%	0,13	0,37%
16	1,180	12,91	36,39%	15,29	43,52%	22,97	65,95%
30	0,590	0,76	2,14%	6,38	18,16%	9,71	27,88%
50	0,297	0,01	0,03%	0,98	2,79%	1,39	3,99%
100	0,149	0,00	0,00%	0,05	0,14%	0,59	1,69%
Total	-	35,48	100,00%	35,13	100,00%	34,79	100,00%

Tabela 2 – Composição Granulométrica de pinus, palha de milho e PET

De acordo com Alves (2013)[12] partículas de madeira que proporcionam melhor desempenho aos painéis se encontram entre 2 à 6mm, e conforme descrito por P. Klímek et al. (2016)[13], partículas com maior comprimento contribuem para a resistência à flexão, e as de menor comprimento, contribuem para a resistência à tração perpendicular dos painéis.

3.2 Densidade dos painéis e a Razão de Compactação

A Razão de Compactação (F) foi determinada considerando-se a relação entre a densidade aparente dos paineis e a densidade das misturas (M) de maravalhas (densidades em Kg/cm^3). Foram obtidos os seguintes valores de F para M1 (875/103-) F= 8,50; para M2 (826/103) F = 8,26; para M3 (963/104) F = 9,26; para M4 (942/105) F = 8,97; M5 (891/108) F = 8,25; M6 (1030/116) F = 8,88; M7 (1001/141) F = 7,10. Ressalta-se que as densidades das maravalhas foram determinadas com umidade entre 3 a 5%.

3.3 Absorção 24h, inchamento 24h e teor de umidade

Os valores médios de Absorção (AA24h), Inchamento (IE 24h) e Teor de umidade (TU), são apresentados na Tabela 3.

MISTURAS	AA24h (%)	IE 24h (%)	TU (%)
PM1	**77,10** (± 11,43)*	**26,18** (± 10,29)	8,70 (± 1,97)
PM2	**91,78** (± 14,14)	**29,68** (± 7,42)	5,44 (± 3,95)
PM3	61,96 (± 25,65)	25,94 (± 2,99)	8,45 (± 2,55)
PM4	64,01 (± 15,07)	24,75 (± 9,13)	8,85 (± 2,08)
PM5	59, 66 (± 11,17)	17, 11 (± 8,29)	9, 02 (± 1,51)
PM6	**34, 53** (± 11,53)	**13,94** (± 12, 62)	8,74 (± 2,52)
PM7	**29,77** (± 11,74)	**10,83** (± 20,31)	8,44 (± 6,59)
100% de palha de milho no miolo do painel (Silva et al, 2015)[14]	164	72	-
100% palha de milho misturada no painel (Silva et al, 2015)[14]	189	80	-
Teca + 10% PET (Ferreira & Knuth, 2019) [15]	72 (± 12,35)	10,70 (± 11,22)	6,28

* () coeficiente de variação

Tabela 3 – Valores médios de Absorção, Inchamento e Teor de umidade obtidos por meio de ensaios e alguns valores pesquisados na literatura corrente.

De acordo com os objetivos desse estudo e considerando os valores das propriedades físicas dos painéis apresentados das misturas (PM) na Tabela 3, verifica-se que, tanto o incremento da palha de milho como da PET e do adesivo PU-Mamona em painéis propiciaram melhorias nas propriedades físicas, os PM6 e os PM7 apresentaram AA24h e IE24h inferior quando se comparado os PM1 de referência. O **IE24h** dos PM7 à **10,83%** foi o menor valor de inchamento encontrado em comparação ao PM1 **26,18%**. O pior resultado porém, foi quando se adicionou PET com pinus (PM2) **AA24 91,78%** e **IE24h 29,68%**, evidenciando assim que a subistituição de palha melhorou significativamente as propriedades dos painéis.

Vale ressaltar que em comparação com as referências bibliográficas citadas na Tabela 3, nos painéis das misturas estudadas, quase todos tiveram um desempenho melhor nas suas propriedades. Os valores encontrados na literatura, foram de **AA24h: 164%, 189% 72%** e o **IE24h: 72%, 80%, 10,70%** respectivamente. Logo atribui ao uso da resina as melhorias das propriedades físicas.

Segundo Fiorelli et all. (2012)[16], a resina Poliuretana (PU) derivada de óleo de mamona, além de garantir resistência mecânica aos painéis, melhora suas propriedades de resistência à água, enquanto que, comparativamente com a resina Ureia Formaldeído (UF) são encontrados baixas resistências à água.

3.4 Propriedades mecânicas

Com base nos valores obtidos com os ensaios para determinação das propriedades físicas dos painéis, foram produzidos novos painéis para avaliação de suas propriedades mecânicas e, consequentemente, optou-se por selecionar as misturas M5, M6 e M7,

por serem constituídas com os quatro elementos objeto de análise dessa pesquisa, ou seja, a madeira de pinus, a palha de milho, a PET e a PU-Mamona

Na Tabela 4 são apresentados os valores das médias do Módulo de Elasticidade (MOE), Módulo de Resistência à Flexão Estática (MOR) e Resistência a Tração Perpendicular (TP).

MISTURAS	MOE (MPa)	MOR (MPa)	TP (MPa)
M5	1906 (± 9,69)*	16,81(± 5,81)	0,72 (± 14,59)
M6	**2339** (± 6,72)	**26,55** (± 6,12)	**0,96** (± 12,61)
M7	**2080** (± 6,60)	**28,99** (± 5,31)	**1,18** (± 9,06)
100% de palha de milho no miolo do painel (Silva et al, 2015)[14]	872	6,3	0,14
100% palha de milho misturada no painel (Silva et al, 2015)[14]	710	5,0	0,08
Teca + 10% PET (Ferreira & Knuth, 2019)[15]	-	-	0,57 (± 24,33)

* () coeficiente de variação

Tabela 4 – Valores de MOE, MOR e TP.

Com relação às propriedades de resistência e rigidez dos painéis, verifica-se na Tabela 4 que os valores médios determinados se mantêm em conformidade com o comportamento das propriedades físicas determinadas, ou seja, a presença da palha de milho, da PET e da PU-Mamona misturados com madeira de pinus, melhoraram essas propriedades em comparação com os estudos observados na literatura corrente, conforme pode ser observado nas referencias apresentadas na Tabela 4. Ressalta-se que as propriedades de resistência e rigidez dos painéis se apresentam com valores médios com a mesma ordem de grandeza entre si.

4 | CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas nos estudos preliminares para caracterização de painéis aglomerados homogêneos, produzidos com misturas de madeira de pinus, palha de milho, PET e PU-Mamona, constataram-se forte interação entre os materiais estudados. Ao se comparar os resultados obtidos com os valores mínimos das propriedades físicas e mecânicas propostas pelo documento normativo NBR14810-2/2018[10-11], observa-se que os painéis produzidos com as misturas M5, M6 e M7 estão condizentes com o documento normativo em referência.

Outro aspecto muito importante está relacionado com a possibilidade de emprego da palha de milho, PET e PU-Mamona na composição de misturas de painéis aglomerados de madeira de pinus; constituindo uma importante alternativa para o emprego desse produto de modo geral na Construção Civil e na indústria moveleira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior - CAPES pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa e ao grupo MAC - Materiais Alternativos de Construção (Unesp - Ilha).

REFERÊNCIAS

1. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF. **Serviço Florestal Brasileiro**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: http://snif.florestal.gov.br/ptbr/conhecendo-sobre-florestas. Acesso em: 03 mai. 2021.

2. BUZO, A. L. S. C**;** SILVA, S. A. M**.Painéis aglomerados produzidos com partículas de pinus e bagaço de cana empregando-se ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. 12-38 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Faculdade de Engenharia, Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP.

3. VISNARDI, O. C. *et* al. Produção e Avaliação Física de Chapas de Partículas de Bambu da Espécie Dendrocalamus giganteus. In. XII Encontro Brasileiro em Madeira e Estrutura de Madeira, Lavras, Minas Gerais. **Anais do XII EMBRAMEM**, 2010.

4. GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. **Painéis de madeira de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

5. CATTO, A. L. *et* al. Influence of coupling agent in compatibility of post-consumer HDPE in thermoplastic composites reinforced with eucalyptus fiber. **Mat. Res**. São Carlos, v. 17, supl. 1, p. 203-209, 2014

6. CASTRO, G. S. A. *et al*. **XV Seminário Nacional Milho Safrinha- Livro de Palestras**: Desafios no Cultivo do Milho Safrinha. 1. ed. Sete Lagoas, MG: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2019. p. 9-35.

7. CONAB. **SÉRIE HISTÓRICA DAS SAFRAS**. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=20. Acesso em: 31 mai. 2021.

8. SUGAHARA, E. S; SILVA, S. A. M**. Painéis aglomerados produzidos com partículas de eucalipto e bagaço de cana com adesivo ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. 61-68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) **–** Faculdade de Engenharia, Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 14810-1**: painéis de partículas de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2013a.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 14810-2**: painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013b.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR NM 248**: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

12. ALVES, L. S. **Aproveitamento de Resíduos de Empresas Moveleiras da Região de São José do Rio Preto para Confecção e Avaliação de Painéis Aglomerados**. Ilha Solteira, 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2013.

13. KLÍMEK, P.*et* al. Using sunflower (Helianthus annuus L.), topinambour (Helianthus tuberosus L.) and cup-plant (Silphium perfoliatum L.) stalks as alternative raw materials for particleboards. **Industrial Crops and Products**, vol.92 (2016) 157–164.

14. Silva *et* al. MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 853-862, dez. 2015.

15. Ferreira, E.S; Knuth. APropriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de Tectona grandis produzidos com adição de diferentes teores de PET. **IV CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**, Santarém -Pará, Outubro de 2019.

16. FIORELLI, J. *et* al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. **Industrial Crops And Products**, Amsterdam, v. 40, p.69-75, 2012.

ESTUDO DO EMPREGO DE AGREGADOS CERÂMICOS EM CONCRETO PERMEÁVEL

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081143

STRIEDER; HELENA L.[1]; DUTRA; VANESSA F. P.[1]; GRAEFF; Ângela G.[1] ; MERTEN; FELIPE R. M.[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: HELENA.STRIEDER@UFRGS.BR

RESUMO: O estudo avaliou o desempenho mecânico e hidráulico de concreto permeável constituído por agregados reciclados de cerâmica. Visando um maior controle do material utilizado, para a produção do agregado foram britados blocos cerâmicos maciços e ajustou-se a curva granulométrica em uma faixa uniforme com diâmetro máximo de 12,5 mm. Foram analisados o procedimento de britagem e o beneficiamento. Os resultados obtidos foram comparados a um traço referência, composto unicamente por agregados naturais. Foram evidenciados o desprendimento e a elevada abrasão dos agregados reciclados. Estes fatos foram associados *à* redução dos valores de porosidade, cerca de 50% do que foi estimado no procedimento de dosagem, e ao baixo desempenho hidráulico da mistura. Entretanto, os resultados mecânicos obtidos evidenciam a potencialidade do uso de agregados cerâmicos para esse fim.

PALAVRAS-CHAVES: Concreto permeável; agregado de cerâmica; agregado reciclado.

ABSTRACT: The study evaluated the mechanical and hydrological performance of pervious concrete with brick aggregates. In order to have better control of the composition, ceramic blocks were crushed and a uniform particle size distribution with a maximum diameter of 12.5 mm was composed. The crushing and beneficiation procedure was analyzed. The results obtained were compared with the reference mixture, composed only of natural aggregates. High abrasion and detachment of recycled aggregates were evidenced. This was associated with a reduction of porosity values, around 50% lower than the estimated, and with the low hydrological performance. However, the mechanical results obtained show the potential of using brick aggregates for this purpose.

KEYWORDS: Pervious concrete; brick aggregate; recycled aggregate.

1 | INTRODUÇÃO

O intenso consumo dos recursos naturais e a geração de resíduos provenientes de demolições e sobras do processo construtivo estão diretamente ligados ao desenvolvimento das cidades e de suas economias. Se por um lado, há uma grande demanda por fontes de matérias-primas, por outro, existe a sobrecarga das áreas de aterros e diversos problemas urbanos relacionados ao descarte inadequado de entulhos. Além disso, devido à intensificação de políticas ambientais e ao crescente estímulo por uma economia circular, o reaproveitamento de resíduos da construção civil (RCC) vem ganhando importância em projetos de engenharia.

Estudos estimam que o RCC é composto entre 22 e 52% por cerâmicos(1). Ainda

chama atenção a quantidade de resíduos gerados na fabricação de tijolos, onde cerca de 13% da produção é descartada por estar em desacordo com especificações de qualidade[2]. Além disso, diferentes autores têm mostrado a viabilidade do uso de agregados cerâmicos, devido ao bom desempenho mecânico e baixo custo de reciclagem[3,4]. Esses indícios de que o material é viável para a fabricação de elementos de concreto foi um dos fundamentos para a proposição desse estudo que, todavia, buscou uma aplicação inovadora, em concreto permeável.

O concreto permeável vem se destacando devido à sua contribuição ambiental, especialmente em centros urbanos, onde os efeitos de impermeabilização do solo e ilhas de calor são mais severos. Esse concreto especial tem elevada porosidade, permitindo a passagem do fluxo de água. Assim, a principal intenção do uso do concreto permeável é controlar as águas pluviais, permitindo a infiltração e a recarga das águas subterrâneas. Estudos recentes provaram a potencialidade do uso de agregados reciclados para esse fim[5-9]. Verificou-se que desempenho depende da composição da mistura, da distribuição granulométrica, do uso de aditivos e adições. Foram encontrados valores entre 2,6 e 34,0 MPa para resistência à compressão[4,9], 1,8 e 2,1 MPa para resistência à tração na flexão[6] e coeficiente de permeabilidade entre 5,3 e 24,8 mm/s[4,6].

O desempenho hidráulico do material depende essencialmente da elevada porosidade da mistura. Por outro lado, esse é o fator que exerce especial influência em propriedades mecânicas inferiores em relação a um concreto convencional. Nesse contexto, este estudo buscou avaliar o efeito da substituição de agregados naturais por reciclados de cerâmica em relação às características mecânicas e hidráulicas. Dessa forma, os objetivos estão divididos em duas fases: (i) entendimento e controle das propriedades físicas do agregado cerâmico e (ii) avaliação do comportamento de misturas recicladas através de ensaios laboratoriais.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI: MAX). O agregado natural é de origem basáltica, com massa específica de 2,90 kg/dm³, absorção de 0,29% e granulometria variando de 2,4 a 12,5 mm. O agregado reciclado de cerâmica apresenta massa específica de 2,50 kg/dm³ e absorção de 16,6%.

2.2 Processo de beneficiamento do agregado reciclado

Os agregados cerâmicos foram produzidos com o auxílio de um britador terciário do tipo cônico, obtendo fragmentos com diâmetro máximo de 36 mm. Uma vez que a distribuição granulométrica influencia fortemente as propriedades da mistura permeável, o material foi peneirado e misturado de acordo com a distribuição granulométrica do agregado natural.

Devido à elevada porosidade e capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, o seu uso pode interferir na relação água/cimento (a/c), na ligação entre as partículas e na trabalhabilidade das misturas[8]. Desta forma, avaliou-se a absorção do agregado cerâmico ao longo do tempo de acordo com o procedimento descrito por Leite[10]. Através da Figura 1 é possível observar que o material absorve mais de 50%

da massa total de água antes dos primeiros 20 min submersos. Levando isso em conta, os agregados graúdos foram pré-umedecido durante 30 min para serem misturados na condição saturado superfície seca.

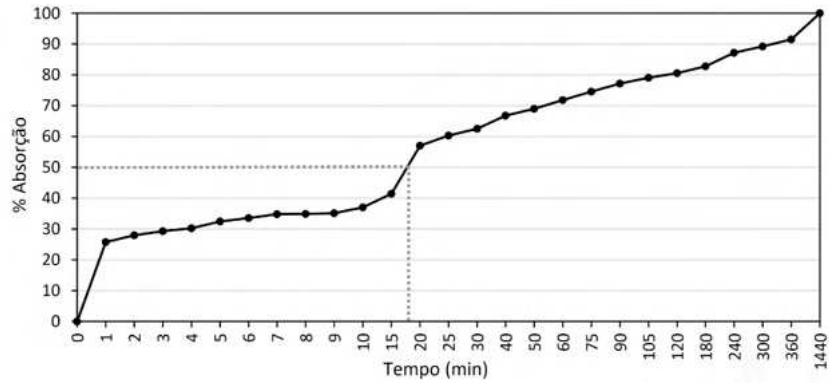


Figura 1 – Curva de absorção do agregado reciclado cerâmico ao longo do tempo

2.3 Traços avaliados

Empregou-se a composição de 1: 3 (cimento: agregados), relação a/c de 0,3 e porosidade estimada de 20%. Foi utilizado o método de dosagem IPT/EPUSP[11]. A mistura composta unicamente por agregado natural (NA) foi utilizada como referência. A substituição pelo agregado reciclado foi feita em volume, correspondendo a mistura CER.

2.4 Moldagem dos corpos de prova

O procedimento de concretagem do concreto permeável seguiu aquele recomendado por Costa[12]. Para cada traço foram moldados seis corpos cilíndricos de 100x200 mm por compactação dinâmica com um soquete de 2,5 kg em três camadas, e três vigotas de 100x100x400 mm, compactadas com um rolo metálico de 48,8 kg/m em uma única camada. A Figura 2 apresenta o aspecto das amostras compostas pelo agregado cerâmico em estudo.



Figura 2 – Aspecto das amostras referentes a mistura reciclada

2.5 Ensaios realizados

Foram determinadas a porosidade total e a densidade no estado endurecido, seguindo a ASTM C1754[13]. O coeficiente de condutividade hidráulica foi determinado de acordo com a ASTM D5084[14], utilizando um permeâmetro de carga variável. O ensaio de taxa de infiltração foi uma adaptação da ASTM C1701[15], conforme procedimento descrito por Costa *et. al*[12]. Os ensaios físicos e hidráulicos ocorreram aos 25 dias de cura.

A determinação da resistência à compressão axial e à tração na flexão seguiu o procedimento da NBR 5739[16] e NBR 12142[17], respectivamente. A determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de *Poisson* seguiram a NBR 8522[18]. Os ensaios mecânicos ocorreram aos 28 dias. Além disso, a resistência a compressão axial também foi determinada aos 7 dias.

3 | RESULTADOS

3.1 Ensaios físicos

Na Figura 3 está apresentado o comparativo entre os resultados de porosidade total para a mistura de agregado reciclado e a referência. Verificou-se que a porosidade média atingida para a mistura composta por agregados cerâmicos foi de 9,3%, aproximadamente 53% inferior à estimada no procedimento de dosagem. Isso pode ser explicado devido à elevada abrasão e quebra do agregado cerâmico durante a compactação das amostras, o que impacta na redução de interconectividade dos poros e densificação das misturas. Além disso, o resultado médio de densidade no estado endurecido da mistura reciclada foi de 1881 kg/m3, cerca de 12% inferior à referência, conforme pode ser observado na Figura 4. Essa redução já era esperada uma vez que a densidade do agregado cerâmico é inferior à do agregado natural.

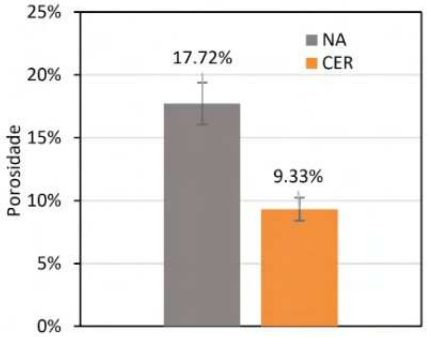


Figura 3 – Porosidade média e desvio padrão

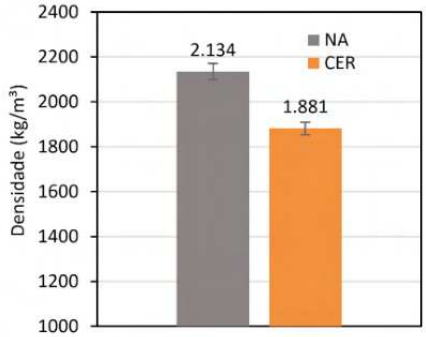


Figura 4 – Densidade média e desvio padrão

3.2 Ensaios hidráulicos

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de taxa de infiltração (Figura 5) e coeficiente de condutividade hidráulica (Figura 6). Ambos os resultados são inferiores para a mistura com agregados reciclados. Este fato pode ser explicado pela excessiva redução da porosidade e selamento da superfície causada pela compactação, o que dificulta a passagem de água.

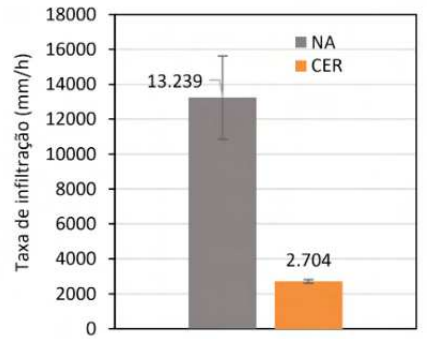


Figura 5 – Taxa de infiltração média

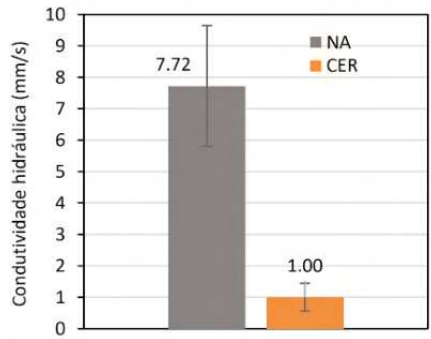


Figura 6 – Condutividade hidráulica média

O valor médio de taxa de infiltração foi de 2.704 mm/h, correspondendo a uma redução de 87% em relação à referência. Para a condutividade hidráulica, verificou-se média de 1 mm/s, o que representa uma redução de aproximadamente 80%. Esse valor médio corresponde ao mínimo indicado pela NBR 16.416[19] para ser usado como revestimento permeável de pavimentos. Os valores de coeficiente de condutividade hidráulica obtidos são inferiores aos encontrados na literatura para misturas permeáveis compostas exclusivamente por agregados cerâmicos. Foram encontrados, por exemplo, resultados variando ente 5,3 e 19,1 mm/s[4] e, em outro estudo, foi atingida uma média de 24,8 mm/s[6].

3.3 Ensaios mecânicos

A Figura 7 apresenta os resultados médios e desvio padrão de resistência à compressão axial para ambas as misturas nas idades de cura de 7 e 28 dias. Os valores obtidos para a mistura de agregados reciclados ficaram entre 13,37 e 15,41 MPa, sendo que a mistura referência atingiu resistência média de 22,06 MPa aos 28 dias de cura. Foi verificado que aos 7 dias de cura, a mistura reciclada já estava com 88% da resistência final. De acordo com a ACI 522R[20], a resistência à compressão pode variar entre 3,5 e 28 MPa dependendo do uso. Além disso, os resultados obtidos estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura[4,6].

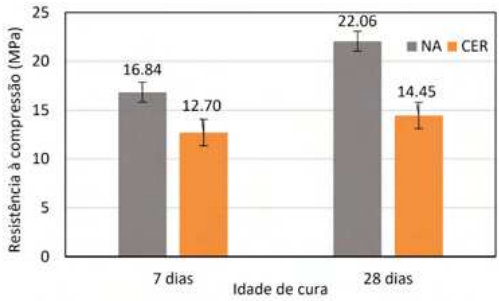


Figura 7 – Resistência à compressão axial

Foi determinado o módulo elástico à compressão e, concomitantemente, foram medidas as deformações para determinação do coeficiente de *Poisson*, cujos resultados estão na Figura 8. O valor médio de módulo ficou em 7,87 MPa, representando uma redução de 63,5% em relação à referência. O coeficiente de *Poisson* atingiu um valor de 0,14, enquanto para a mistura natural foi de 0,12. Essa diferença pode ser explicada uma vez que a mistura reciclada, devido a porosidade reduzida, deforma menos ao receber as tensões.

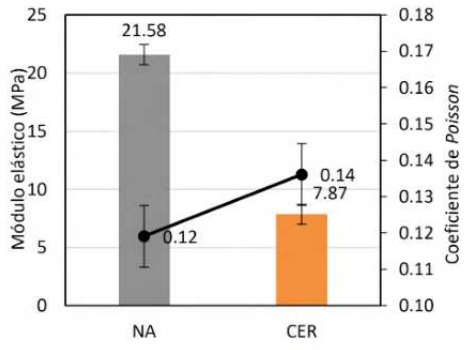


Figura 8 – Módulo elástico e *Poisson*

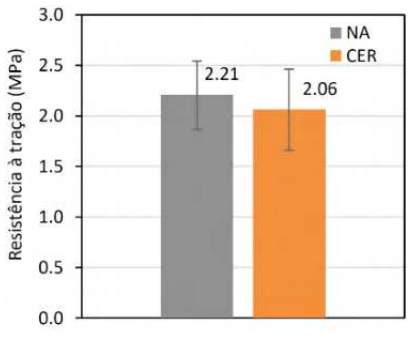


Figura 9 – Resistência à tração na flexão

Na Figura 9 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão. Os valores obtidos variaram entre 1,78 e 2,35 MPa e, através de análise de variância (ANOVA) verificou-se que esses resultados não divergem da referência, que atingiu média de 2,21 MPa. É importante destacar que a norma brasileira para pavimentos de concreto permeável[19] recomenda resistência à tração na flexão característica de 2 MPa para o uso como concreto permeável moldado no local. Além disso, os resultados dessa pesquisa estão dentro da faixa de valores obtidos por outros autores, onde foi encontrado, por exemplo, média de 2,14 MPa para tração na flexão para misturas com 100% de agregados cerâmicos[6].

4 | CONCLUSÕES

A pesquisa avaliou a possibilidade do uso de agregados cerâmicos para a produção de concreto permeável através de ensaios laboratoriais físicos, hidráulicos e mecânicos. Inicialmente, o elevado teor de absorção de água do material evidencia a necessidade de que os agregados reciclados sejam submetidos a uma pré-molhagem como etapa de beneficiamento. Este procedimento evita que absorvam a água da mistura, o que provocaria a redução da relação água/cimento, a escassez de cobrimento, a fraca ligação entre as partículas e a consequente perda de trabalhabilidade.

Também foi possível observar elevada redução nos resultados de porosidade total em relação ao projetado. Isso está diretamente relacionado aos baixos valores de taxa de infiltração e coeficiente de condutividade hidráulica da mistura reciclada em relação à referência. Este fato pode ser explicado devido à elevada abrasão dos agregados cerâmicos durante a moldagem e compactação dos corpos de prova, especialmente na superfície, causando a densificação das misturas e a redução da interconectividade dos vazios, o que dificulta a percolação de água.

Por outro lado, os resultados de resistência mecânica obtidos mostraram a potencialidade do uso de agregados cerâmicos em misturas permeáveis. Entretanto, através da análise dos resultados obtidos, recomenda-se testar outros teores de substituição de agregados naturais por cerâmicos, ou ainda, rever o método de compactação para minimizar o efeito da quebra devido à característica frágil do material reciclado.

REFERÊNCIAS

1. L. Delongui. **Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2016).

2. A.R. Mazumder, A. Kabir, N. Yazdani. Performance of Overburnt Distorted Bricks as Aggregates in Pavement Works, J. **Civil Engineering Journal**. 2006.

3. A.C.J. Tam, V. W.Y.; Mahfooz S.; Evangelista. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**. 2018.

4. B. Debnath, P.P. Sarkar. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. **Construction and Building Materials**. 2019.

5. H. El-Hassan, P. Kianmehr, S. Zouaoui. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**. 2019.

6. I. Ulloa-Mayorga, V. A. *et. al*. Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates. **Ingeneria e Investigation**. 2018.

7. S.P. Yap, P.Z.C. *et. al*. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates, **Journal of Cleaner Production**. 2018.

8. P.M. Thomas, J.; Thaickavil, N.; Wilson. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**. 2018.

9. P. Zaetang, Y. et al., Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. 2016.

10. M.B. Leite. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

11. HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem do concreto**. [s.l: s.n.].

12. L.C.P. Costa, F. B. P. *et. al*. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Ibracon Structures and Materials**. 2018.

13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754**: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. 2012.

15. _____. **ASTM D5084**: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. 2016.

16. _____. **ASTM C1701**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. 2017.

17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2018.

18. _____. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. 2010.

19. _____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. 2017.

20. _____. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. 2015.

21. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R**: Report on Pervious Concrete. 2010.



PRODUÇÃO DE PISOS INTERTRAVADOS EM ESCALA INDUSTRIAL COM A INCORPORAÇÃO DE AREIA DE FUNDIÇÃO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081144

GHISLENI; GEISIELE[1]; LIMA; GEANNINA TEREZINHA DOS SANTOS[2]
[1]CENTRO UNIVERSITÁRIO AVANTIS; [2]UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.
GHISLENI.GEISI@GMAIL.COM

RESUMO: A areia de fundição, é resíduo proveniente da indústria metalúrgica, descartada em aterros industriais controlados, porém, gera elevado custo e preocupação ambiental. Como alternativa de descarte, o estudo objetivou produzir pisos de pavimentos intertravados em escala industrial com o aproveitamento areia de fundição em substituição à areia natural nos teores 10% e 20%. A metodologia consiste em atender NBR 9781 (2013), analise de MEV e TCLP. Nos resultados, a absorção de água foi inferior à 6% e resistência à compressão superior a 35 Mpa, verifica-se microestrutura formada e inerte ao meio aquoso. Verifica0se a areia de fundição como agregado alternativo.

PALAVRAS-CHAVES: Areia de fundição, Reaproveitamento resíduo, Materiais alternativos.

ABSTRACT: Foundry sand is waste from the metallurgical industry, discarded in controlled industrial landfills, however, it generates high costs and environmental concerns. As a disposal alternative, the study aimed to produce interlocking pavement floors on an industrial scale, using foundry sand to replace natural sand in 10% and 20% contents. The methodology consists of meeting NBR 9781 (2013), analysis of SEM and TCLP. In the results, the water absorption was less than 6% and compressive strength greater than 35 Mpa, there is a microstructure formed and inert to the aqueous medium. Foundry sand is verified as an alternative aggregate.

KEYWORDS: Foundry sand; Waste reuse; Alternative materials.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa à nona posição no mundo em produção de ferro fundido, sendo produzidos anualmente 2,28 milhões de toneladas de peças metálicas (ABIFA, 2019) [1]. Segundo Coutinho (2004) [10], a areia apresenta alta capacidade refratária e ampla facilidade de aglutinação quando misturada com argila e/ou aditivos orgânicos e inorgânicos, características importantes para o desenvolvimento de peças fundidas.

Este agregado é responsável pela fabricação dos moldes para o vazamento do metal, como também estabelece a sua forma, admitindo uma perfeita sincronização entre a operação de moldagem e fusão do metal (BHARDWAJ *et al.*, (2017)) [9].

Ao atingir o seu limite de reutilização no processo de fabricação de peças, a areia de fundição (nomeada AF) é destinada ao aterro industrial controlado, devido ao excesso de elementos químicos inseridos na mistura. De acordo com Ghisleni e Lima (2020) [11], quando esses aterros não são monitorados corretamente podem originar

riscos ambientais, pois alteram as características físicas, químicas e biológicas do local, podendo ocasionar a contaminação do solo e água. Além disso, esses aterros apresentam custos elevados em virtude da sua manutenção.

A reutilização ou reaproveitamento da areia de fundição é uma opção sustentável, proporcionando economia de matéria-prima, redução de espaços destinados aos aterros para resíduos industriais e diminuição dos custos de coleta e de destinação (LIMA, GHISLENI (2020))[14].

Autores mencionam que as suas características são apropriadas para a produção de materiais de construção civil. Para Bhardwaj *et al.* (2017)[9] e Kaur *et al.* (2012) [13], a areia de fundição possui forma sub angular, arredondada, sendo 85% a 90% de suas partículas constituídas com grãos inferiores a 100 µm e com módulo de finura entre 0,9 a 1,6, propriedades que auxiliam no tamponamento dos poros.

Neste contexto, estudos em concretos e argamassas são desenvolvidos com o intuito de avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural pela areia de fundição (MATOS *et al.* (2019) [16], TORRES *et al.* (2017) [20], SINGH *et al.* (2012) [19], GUNEY *et al.* (2010) [12]. Conforme Singh *et al.* (2012) [19], analisaram as propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) aos 7, 28 e 91 dias de concretos convencionais produzidos com substituição de areia natural nos teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% pela areia de fundição. Com os resultados, os autores concluíram que nas idades mais tardias, as propriedades mecânicas evoluíram consideravelmente para todas as substituições. Além disso, à medida que o teor de substituição aumentou, as propriedades mecânicas aumentaram, exceto para a mistura constituída com 20% AF. Isso também é explanado por Bhardwaj *et al.* (2017) [9], no qual os autores verificaram que a substituição de até 20% de areia natural por areia de fundição pode proporcionar propriedades semelhantes ao concreto de referência (0% AF).

Isto posto, a pesquisa objetiva analisar o comportamento de pisos de concreto intertravado produzidos em escala industrial quanto à absorção de água e resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura, os comparativos são atrelados a misturas com a substituição parcial da areia natural pela areia de fundição nos teores de 0%, 10% e 20%.

2 | MÉTODOS E MATERIAIS

O processo de produção inicia-se com a coleta do material residual em uma empresa de ferro fundido através do processo de quebra de canal. O agregado ficou armazenado na empresa de pré-fabricados, seguindo o preconizado a NBR 11174 (1990) [5]. Todos os procedimentos realizados na pesquisa, estão explanados na Figura 1.

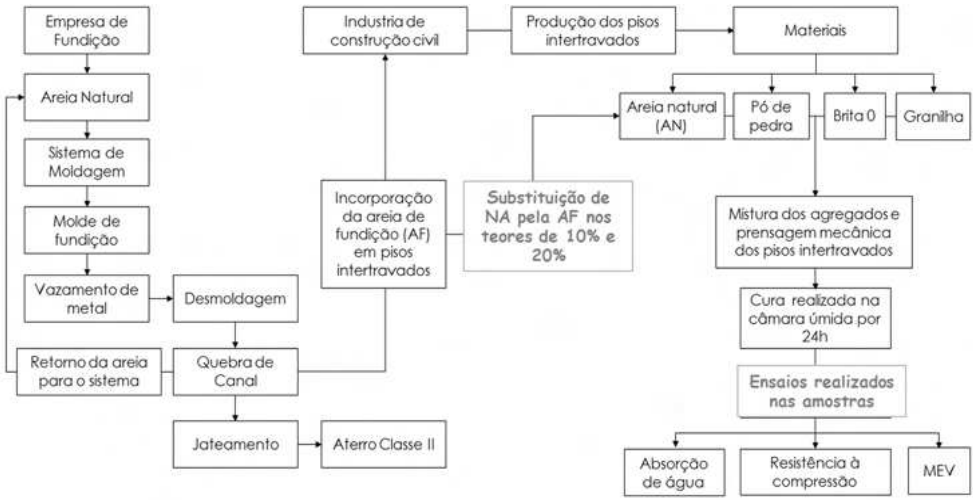


Figura 1- Fluxograma com os procedimentos adotados nesta pesquisa

Fonte: As autoras (2021)

A areia de fundição passou pelo processo de caracterização quanto a sua toxidade devido a sua alta concentração de metais pesados. De acordo com o laudo emitido, a areia de fundição, se apresentou dentro dos limites permitidos pela NBR 10004 (2004) [2] e NBR 10005(2004)[3] sendo material não tóxico, classificada como não inerte, para esta norma Classe II-A.

2.1 Produção industrial

Para a produção dos pisos intertravados primeiramente caracterizou-se os todos os insumos utilizados na mistura, conforme Tabela 1.

Propriedades (NBR NM 52)	CPIV-32 RS	AN	AF	Pó de Pedra	Brita 0	Granilha
Massa específica (g/cm³)	2,83	2,58	2,00	2,70	2,65	2,43
Modulo de Finura		2,6	1,88	2,47	-	-
Diâmetro Máximo (mm)		-	-	4,8	9,5	4,8

Tabela 1 – Caracterização dos insumos

Fonte: As autoras (2021)

Além das propriedades determinou-se o consumo de cada material para o traço. Na Tabela 2, descreve-se os traços utilizados, sendo que a única alteração foi na areia natural para o traço referência e com areia de fundição.

Material	Agregado miúdo	Areia de fundição (AF)	Agregado graúdo	Pó de Pedra	Granilha
Consumo REF (kg/m³)	1544,0	-	1582,0	1719,0	1539,0
Consumo 10%AF (kg/m³)	1389,6	154,4	1582,0	1719,0	1539,0
Consumo 20%AF (kg/m³)	1235,2	308,8	1582,0	1719,0	1539,0

Tabela 2 – Consumo de materiais no traço referência do piso intertravado

Fonte: As autoras (2020)

A mistura das matérias primas foi por sistema mecanizado. Posteriormente, as peças foram moldadas pela prensagem mecânica nas dimensões de 6x10x20 cm (e, l, c), levadas para a câmara úmida a uma temperatura de 23ºC ±1 por 24 horas. Para cada composição e idade (7 e 28 dias) foram produzidos 3 corpos de provas.

2.2 Ensaio de microestrutura e Lixiviação (TCLP)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) caracterizou morfologicamente os constituintes na amostra, para uma análise comparativa entre amostra referência e 10%AF. Já o ensaio de lixiviação referiu-se à NBR 10.005 (2004)[3], no qual consiste a identificação do extrato lixiviado quanto a transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator, classificando-as quanto a periculosidade ao ambiente em comparativo aos parâmetros da NBR 10004 (2004)[2] (LIMA, GHISLENI (2020))[14].

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Absorção de água

Os resultados de absorção aos 7 e 28 dias estão apresentados na Figura 2. Observa-se que as misturas com areia de fundição aos 7dias resultaram em absorção de água maior que a amostra referência (0% AF). Já aos 28 dias, a porcentagem de absorção reduziu conforme o incremento na porcentagem de AF.

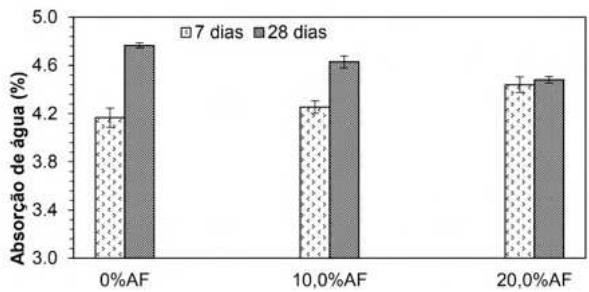


Figura 2 - Resultados de absorção de água aos 7 e 28 dias dos pisos intertravados

Fonte: As autores (2021)

De acordo com a NBR 9781 (2013), todos os resultados analisados de absorção de água dos pisos intertravados, Figura 2, permaneceram entre a faixa permitida inferior a 6%. Sendo assim, por esse ensaio as amostras estão aprovadas para produção com areia de fundição.

3.2 Resistência à compressão

Quanto aos resultados de resistência à compressão estão descritos na Figura 3, para as idades de cura de 7 e 28 dias. Aos 7 dias há evolução de resistência quando os teores de areia de fundição são maiores.

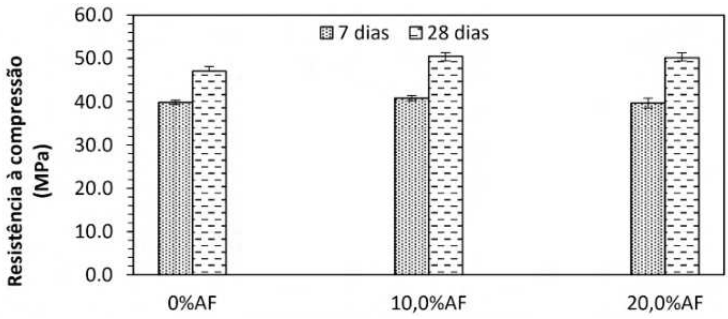


Figura 3- Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias

Fonte: As autoras (2021)

Ao analisar a Figura 3 aos 7dias, a mistura com 10%AF apresenta valores de resistência à compressão superiores ao piso de referência (0% AF). Já aos 28 dias, a resistência à compressão aumentou para todos os teores de AF que aos 7 dias. Sendo que as misturas com areia de fundição superiores a referência. A composição da areia de fundição (AF) que apresenta maior interação na hidratação da mistura em idade mais tardias, no caso 28 dias.

3.3 Ensaio de Microestrutura e Lixiviação

As imagens de MEV estão representadas na Figura 4, sendo que a mistura referência (0% AF) refere-se a Figura 4.A e, a mistura com 10% AF representa-se na Figura 4.B. A mistura 0%AF, (Figura 4.A), representa o agregado, a composição C-S-H e o CH. Já a mistura com 10%AF (Figura 4.B), representa um refinamento da pasta, obtendo maior formação de cristais, principalmente grumos de C-S-H, em relação à mistura referência, Figura 4.A.

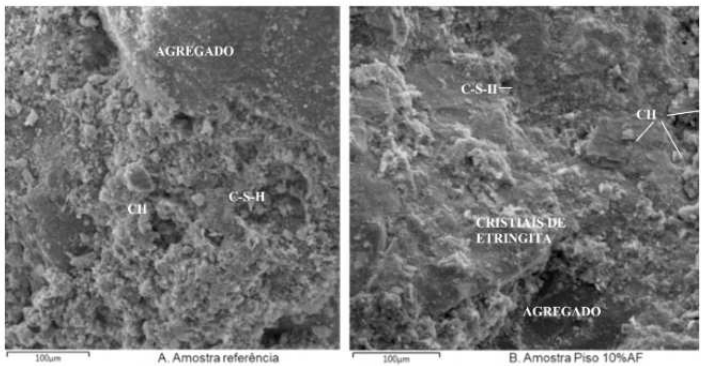


Figura 4 – MEV nas amostras referência e piso 10% AF

Fonte: As autoras (2020)

Esse aumento dos cristais analisados no ensaio MEV para a composição com 10%AF, Figura 4.B, reflete diretamente nos valores de resistência à compressão, Figura 3. Em que, a mistura com 10% areia de fundição obteve aumento de resistência em relação a mistura 0% de areia de fundição. Portanto, analisa-se que ocorreu reação entre a areia de fundição e o CH da hidratação do concreto, desenvolvendo C-S-H secundários.

Nas mesmas amostras que se realizou MEV, testou-se o ensaio de TCLP. Os resultados obtidos estão elucidados na Tabela 5.

Composto	Cd	Cr	Pb	As	Se	Ag	Ba	Hg
0%AF (mg/l)	0,001	0,265	<0,005	0,021	<0,0005	<0,005	0,543	<0,0002
10%AF (mg/l)	0,002	0,07	<0,01	<0,02	0,04	0,03	0,25	ND

Tabela 5- Ensaio de lixiviação TCLP areia de fundição e piso 10% A.F.

Fonte: Os autores (2020)

Verifica-se nos resultados de TCLP, Tabela 5, que os compostos químicos presentes na areia de fundição ficaram inertes na mistura de piso intertravado com 10%AF, pois a amostra com 10%AF apresentou teores inferiores a REF. Ao verificar estes valores e compara-los com os limites estipulados na NBR 10004 (2004)[2], as composições testadas se classificam na Classe II-A, não perigoso. Portanto, a mistura 10%AF pode ser produzida e empregada ao meio, uma vez que os metais pesados ficam inertes ao meio circundante.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de absorção de água e de resistência à compressão para os pisos

intertravados com areia de fundição apresentaram valores satisfatórios à norma. Absorção de água inferior a 6% e a resistência à compressão superior a 35MPa, conforme NBR 9781 (2013) [6].

Dentre os teores analisados, o piso intertravado com 10% AF obteve melhor desempenho aos 28 dias, com absorção de água inferior a referência e, resistência à compressão superior a todas as misturas. Comprovou-se por MEV e TCLP, a presença de maiores quantidades de C-S-H nesta mistura que à referência (0%AF) e os compostos químicos focaram inertes em meio aquoso, comprovando uma mistura mais coesa.

Além disso, os pisos com areia de fundição são uma alternativa sustentável para a construção civil e a indústria de fundição, uma vez que, há reutilização deste resíduo reflete na redução de materiais naturais e na diminuição de insumo nos aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). Link < http://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019/ > 2020.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2013.

3. _____.**NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004.

4. _____.**NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

5. _____.**NBR 11174**: Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III – inertes. Rio de Janeiro, 1990.

6. _____.**NBR 9781**: Método de ensaio para determinação da resistência à compressão de peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro, 2013.

7. _____.**NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

8. _____.**NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

9. BHARDWAJ, B; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**. v. 156, p, 661- 667. 2017.

10. COUTINHO, B, N. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas**. 2004. 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

11. GHISLENI, G; LIMA, G, T, S. Estudo da viabilidade de reutilização da areia de fundição na produção de blocos de concreto e concreto convencional. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. v.9, p 551 – 570. 2020.

12. GUNEY, Y; SARI, Y.D; YALCIN, M; TUNCAN, A; DONMEZ, S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Manag**. v. 30. p 1705 - 1713. 2010.

13. KAUR, G; SIDDIQUE, R; RAJOR, A. Properties of concrete containing fungal treated waste foundry sand. **Construction and Building Materials**. v 29, p, 82 – 87. 2012.

14. LIMA, Geannina Terezinha dos Santos Lima; ² GHISLENI, Geisiele. Análise do desempenho de pisos intertravados com a incorporação de areia de fundição produzidos em escala industrial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

15. MARTINS, M, A, B; BARROS, R, M; SILVA, G; SANTOS, I, F, S. Study on waste foundry exhaust sand, WFES, as a partial substitute of fine aggregates in conventional concrete. **Sustainable Cities and Society**. v. 45, p. 187-196. 2019.

16. MATOS, P. R; MARCON, M. F; SCHANKOSKI, R. A; PRUDÊNCIO, L. P. Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. **Journal of Environmental Management**. v. 244, p 294 - 303. 2019.

17. SANTOS, C, C; DALLA VALENTINA L, V, O; CUZINSKY, F, C. Peças de concreto para pavimentos intertravados produzidos com resíduos de areia de fundição. **60º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Águas de Lindóia – São Paulo. 2016. Link < http://metallum.com.br/60cbc/anais/PDF/13-064TT.pdf >

18. SCHVAICKARDT, C, M; Mattos, J, R, G. Proposta de traço para blocos de concreto de pavimento intertravado. **Tecno-lógica**. v. 22, n.2, p. 157-166. 2018.

19. SINGHA, G; SIDDIQUEB, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials**. v 26, p, 416 - 422. Jan (2012).

20. TORRES, A; BARTLETT, L; PILGRIM, C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**. v. 135, p 674 - 681. 2017.



APLICAÇÃO DE RESÍDUOS DA REGIÃO AMAZÔNICA EM ÁLCALI-ATIVADOS VISANDO O SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081145

RIBEIRO; RAFAELA CRISTINA ALVES[1]; CAMPOS; PATRICK CORDEIRO[1]; BRITO; WOSHINGTON DA SILVA[1]; PICANÇO; MARCELO SOUZA[1]; GOMES-PIMENTEL; MAURÍLIO[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: RAFAELACRISTINA.18@HOTMAIL.COM

RESUMO: O caulim flint e a cinza volante são resíduos da região amazônica que possuem quantidades expressivas de óxidos de silício e alumínio em sua composição; logo, possuem potencial para a produção de materiais álcali-ativados. Portanto, caracterizou-se as propriedades mecânicas e *índices físicos* de uma pasta álcali-ativada a base de caulim flint e cinza volante para aplicação na construção civil. Os resultados mostram um ganho de resistência à compressão à medida que o caulim é substituído por cinza volante, porém a absorção de água se mantém alta independente da formulação.

PALAVRAS-CHAVES: Caulim flint, cinza volante, material álcali-ativado, argila calcinada, propriedades mecânicas.

ABSTRACT: Flint kaolin and fly ash are residues from the Amazon region that have significant amounts of silicon and aluminum oxides in their composition; therefore, they have potential for the production of alkali-activated materials. Therefore, the mechanical and durability properties of an alkali-activated paste based on flint kaolin and fly ash for application in civil construction were characterized. The results show a gain in compressive strength as kaolin is replaced by fly ash, but water absorption remains high regardless of the formulation.

KEYWORDS: Flint kaolin, fly ash, alkali-activated material, calcined clay, mechanical properties.

1 | INTRODUÇÃO

Segundo o Sumário Mineral de 2017, na indústria do caulim o Brasil em 2016 era o sétimo maior produtor desse mineral(1). E nesse cenário de mineração do caulim, um grande volume de rejeito é formado por um caulim duro denominado flint ou semi-flint que recobre o caulim soft, o qual é o produto de interesse principal das indústrias de papel, cerâmica e tinta(2). Entretanto, nesse caulim flint que é descartado pela indústria devido a presença de óxidos de ferro e titânio que alteram sua cor original, é possível encontrar um argilomineral denominado caulinita que caracteriza o caulim como um material aluminossilicato, ou seja, sílica e alumina são predominantes nesse rejeito(2,3). Assim, a partir dessas características o caulim flint que é descartado pode ganhar aplicações na construção civil por meio da ativação alcalina.

Além disso, uma forma alternativa de gerar eletricidade a partir da queima do

carvão, uma rocha sedimentar orgânica, resulta em um resíduo que é denominado cinza volante. Como o carvão consiste em um complexo de substâncias, a American Society for Testing and Materials (ASTM) classifica esse resíduo na norma ASTM C618 em dois tipos de acordo com a composição: Classe F e Classe C. A diferença entre os dois tipos consiste principalmente na variação da quantidade de cálcio presente na cinza volante, ou seja, quando o teor de cálcio é baixo (<10%), a cinza volante é da Classe F e é Classe C quando esse teor é alto (>20%)[4,5]. Nesse processo de combustão do carvão, 80% dos subprodutos são formados pela cinza volante, um material com quantidade expressivas de óxidos de sílica, alumínio, ferro e cálcio[6], o que sugere ser possível utilizar a cinza para produzir materiais álcali-ativados.

Diante disso, uma forma de aplicação do rejeito e resíduo supracitados são os materiais ativados por álcali. Esses ligantes são formados por meio da reação entre um precursor à base de aluminossilicato amorfo e uma fonte alcalina. Ademais, os materiais álcali-ativados apresentam uma baixa emissão de CO_2 e propriedades semelhantes aos concretos cimentícios à base de Cimento Portland, como alta resistência mecânica, resistência a altas temperaturas e ataques ácidos e químicos[5]. Assim, caracterizou-se as propriedades mecânicas e *índices físicos* de uma pasta álcali-ativada a base de caulim flint calcinado e cinza volante com alto teor de cálcio para aplicação na construção civil.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Para a síntese do material álcali ativado foram utilizados como precursores aluminossilicatos a cinza volante (ρ = 2,49 g/cm3) coletada na refinaria de alumina Hydro Alunorte, localizado no munícipio de Barcarena-PA e o caulim flint (ρ = 2,72 g/cm3). Como ativadores alcalinos utilizou-se um silicato de sódio de módulo de sílica (Si/Na) igual a 2,19, constituído de 14,62% de Na_2O e 32,54% de SiO_2 e densidade de 1,57 g/cm3, além de uma solução de hidróxido de sódio 12M com pureza 98% preparada previamente (24 horas antes do preparo das pastas alcalinas). E por fim, a água de pH igual 6. Com o auxílio da fluorescência de raios X pode-se observar que a composição química (Tabela 1) da cinza volante e do caulim flint depois da calcinação indica grandes quantidade de óxido de silício (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3), sendo o caulim também composto por algumas impurezas (Fe_2O_3 e TiO_2) e a cinza volante com alto teor de óxido de cálcio (CaO), caracterizando-a como Classe C [5,12].

Material	Composição química (%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	P_2O_5	TiO_2	CaO	Na_2O	Perda ao fogo
Cinza volante	42,53	16,40	7,08	0,26	0,00	0,90	19,01	0,94	12,88
Caulim flint	43,89	38,97	1,38	-	<0,001	1,29	0,01	0,13	14,46

Tabela 1 – Composição química da cinza volante e do caulim flint

O caulim flint fornecido pela Imerys – Rio Capim S.A, localizada no munícipio de Ipixuna-PA é um material composto principalmente pelo argilomineral caulinita em uma forma cristalina ($Al_2Si_2O_5(OH)$). Assim, foi necessário realizar um beneficiamento no material (Figura 1) por meio do tratamento térmico para transformar a fase cristalina em uma fase amorfa e mais reativa, a metacaulinita[7]. Para isso uma análise termogravimétrica do material foi feita para determinar a temperatura de calcinação ideal para desidroxilação da caulinita. A análise termogravimétrica indica duas faixas de temperaturas muito importantes e próximas: em 540 °C, na qual ocorria a decomposição da caulinita para a formação da metacaulinita e em 880 °C em que ocorria a decomposição da metacaulinita[2]. Dessa forma, optou-se por calcinar o caulim flint por 2 (duas) horas a 800 °C baseado na estabilização da perda de massa em torno dessa temperatura e em estudos anteriores que também utilizaram valores de temperaturas próximas a esta[7]. Após o processo de calcinação para concluir o beneficiamento, o material foi submetido a moagem por 1 (uma) hora em um moinho de bolas utilizando a proporção de 1kg de material para 3,86kg de bolas pequenas (φ = 20mm) e 6,32kg de bolas grandes (φ = 12mm), além da desagregação das partículas na peneira de abertura de 150µm.

Os precursores também foram caracterizados quanto a sua mineralogia e granulometria. Observando os resultados da análise mineralógica é possível perceber que o caulim flint calcinado é um material amorfo e que pode apresentar uma reatividade maior[7], pois a difração de raios X da cinza volante indica uma grande quantidade de picos referentes as estruturas cristalinas de quartzo, calcita, hematita e gipsita, enquanto o caulim apresenta apenas uma fase cristalina de anatásio. Ademais, a granulometria à laser mostra que a cinza volante e o caulim flint calcinado possui partículas de diâmetro médio igual a 27,5 µm e 121,2 µm respectivamente.

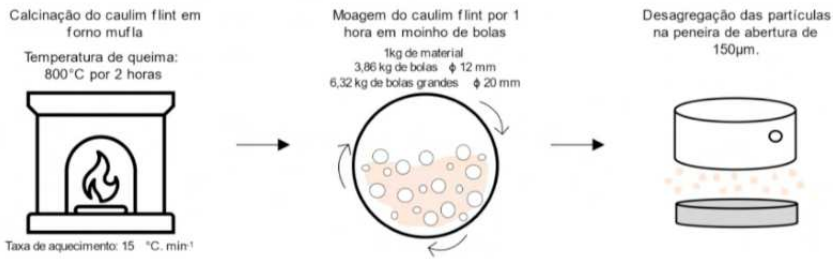


Figura 1 – Processo de beneficiamento do caulim flint

Fonte: Autores

2.2 Métodos

As pastas do material álcali ativado foram preparadas utilizando diferentes porcentagens de cinza volante para o caulim flint calcinado, em conjunto com as duas fontes alcalinas e a água (Tabela 2). Primeiramente, os precursores foram homogeneizados em um recipiente e, em seguida levados ao misturador mecânico em que a água, o silicato de sódio e o hidróxido de sódio foram adicionados simultaneamente. Essa mistura foi realizada por 2 (dois) minutos na velocidade mais baixa do aparelho e em 2 (dois) minutos na velocidade alta, com um intervalo de 30 (trinta) segundos para retirar o material aderido no recipiente para melhor homogeneização da pasta.

Amostras	Proporção de mistura (%)				
	CV	MK	NaOH	Na_2SiO_3	H_2O
10CV90MK	10	90	20,62	60	4,84
40CV60MK	40	60	20,62	60	4,84
80CV20MK	80	20	20,62	60	4,84

Tabela 2 – Proporções em percentuais das pastas álcali-ativadas em relação a massa de cinza volante mais metacaulim flint (CV+MKF)

Finalizado esse processo de preparação das pastas, foi feita a avaliação das propriedades mecânicas e índices físicos. Para avaliar as propriedades no estado endurecido foram moldados 3 (três) prismas (40x40x160 mm) para cada uma das famílias, totalizando 9 amostras, as quais foram adensadas em uma mesa de queda com 10 golpes após o preenchimento total dos moldes. Em seguida, as amostras foram cobertas com plástico PVA e colocadas em uma câmara térmica em cura por 28 dias a uma temperatura de 35°C. Após esse período, foram realizados ensaios para determinar a resistência à compressão e à tração na flexão aos 28 dias de acordo com a NBR 13279[8]. Além disso, para avaliar a absorção de água e índice de vazios seguiu-se as orientações da NBR 9778[9], realizando algumas adaptações quanto ao tempo de fervura reduzindo-o de 5 horas para 1 hora.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades mecânicas

Quanto maior a relação cinza volante para caulim flint, maiores são as resistências mecânicas (Figura 2). Ao analisar a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão de acordo com a NBR 13279 (2019), é possível perceber que o material álcali ativado composto por porcentagens acima de 40% de cinza volante e, consequentemente, com quantidades de caulim flint abaixo de 60% contribuem para o ganho de resistência mecânica. Esse aumento de resistência é ainda mais evidente nos resultados do ensaio de tração na flexão, no qual a menor resistência (3,06 MPa) foi alcançada pelo material composto por 10% de cinza volante e 90% de caulim flint (10CV90MK), enquanto maiores resistências (5,28 MPa; 5,48 MPa) foram atingidas quando o material era composto por 40% cinza e 60% caulim (40CV60MK) e 80% cinza e 20% caulim (80CV20MK), respectivamente. Essa configuração de resistência também se estende aos resultados do ensaio de compressão, ou seja, o material álcali ativado com maiores resistências foram obtidos à medida que a relação cinza volante para caulim flint aumentava (28,80 MPa - 10CV90MK; 43,81MPa - 40CV60MK; 42,42MPA - 80CV20MK).

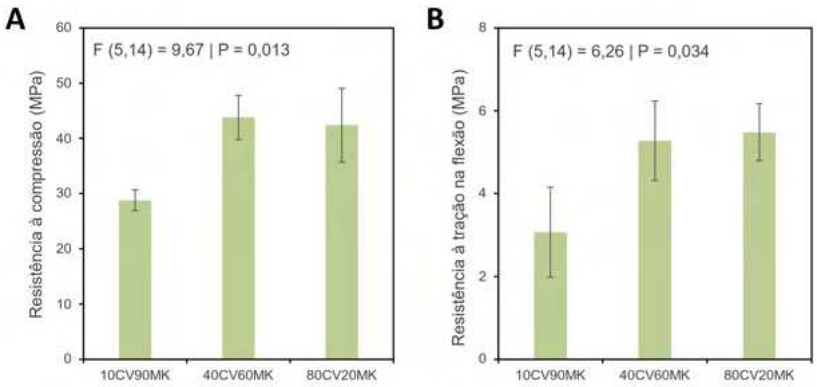


Figura 2 – Propriedades mecânicas aos 28 dias de idade

Fonte: Autores

O ganho de resistência mecânica com o aumento da quantidade de cinza volante pode estar principalmente relacionado a sua composição rica em óxido de cálcio, o qual na ativação alcalina pode reagir de várias formas, sendo uma delas a formação do gel aluminossilicato de cálcio hidratado ou C-(A)-S-H [9] Em sistemas híbridos, normalmente compostos por um precursor com quantidades elevadas de óxido de cálcio e outro precursor aluminossilicato, ocorre a formação desses dois tipos de géis que se coexistem de uma forma estável, colaboram para um incremento nas propriedades do material álcali-ativado. Assim, além do gel geopolimérico N-A-S-H decorrente da ativação do caulim flint, há também a contribuição do gel C-(A)-S-H no comportamento mecânico do material[10]. Além disso, os resultados de resistência obtidos estão em coerência com o relatado na literatura, em que mostra que o aumento da quantidade de metacaulim reduz a formação dos produtos de reação e, consequentemente, da resistência mecânica[11].

3.2 Absorção de água e índice de vazios

A variação da relação cinza volante para caulim flint, diferentemente da resistência mecânica, exerce pouca influência na absorção de água e no índice de vazios (Figura 3). Os resultados de absorção e índice de vazios obtidos segundo a NBR 9778 (2005) indicam uma pequena variação entre as diferentes formulações sugeridas do material álcali ativado, porém apresentam coerência entre si. Assim, a formulação de 10% de cinza volante e 90% de caulim flint (10CV90MK) obteve a menor absorção de água (24,28%) e o menor índice de vazios (34,76%), enquanto os maiores valores (26,69% para absorção e 37,36% para o índice de vazios) estão relacionados ao material composto por 40% cinza e 60% caulim (40CV60MK). Contudo, é valido ressaltar que independentemente da composição todas as amostras aos 28 dias de idade atingiriam valores de absorção relativamente altos. Além disso, sabe-se que essa propriedade do material álcali-ativado está ligada a diversos fatores como a idade do material, sugerindo que aos 28 dias ainda existem muitos poros conectados e que poderão ser reduzidos com o tempo[11].

3.3 Aplicação na construção civil

Os resultados de resistência mecânica sugerem a possibilidade desse material ganhar aplicação na construção civil direcionado ao reparo estrutural do concreto. A Norma Europeia 1504[13], estabelece os requisitos de desempenho de produtos destinados a reparação estrutural e não estrutural do concreto. Assim, para reparo estrutural de concretos de baixa resistência, um dos requisitos necessários é que o material que apresente resistência à compressão ≥ 25 MPa aos 28 dias. Logo, como o material álcali-ativado sintetizado com a cinza volante e o caulim flint atingiu resistências maiores que 25MPa, possui grande potencial para ser destinado ao reparo estrutural do concreto. Porém, os altos valores de absorção e índice de vazios encontrados não estão dentro do intervalo permitido na EN 1504[13]. Desse forma, é necessário realizar mais estudos e investigação dessas propriedades para garantir a correta aplicação do material na construção civil.

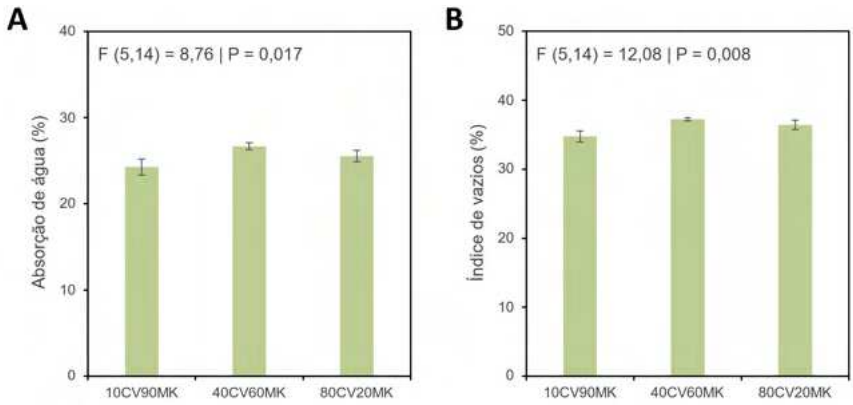


Figura 3 – Absorção de água e índice de vazios aos 28 dias de idade

Fonte: Autores

4 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigado as propriedades mecânicas e índices físicos de um álcali-ativado composto por cinza volante e caulim flint. Sabe-se que rejeitos e resíduos com grandes quantidades de óxidos de silício e alumínio possuem grande potencialidade para a formulação de materiais ativados por álcali. Assim, quanto a propriedade de resistência é possível perceber que quanto maior a relação CV/MK um ganho de resistência significativo ocorre, porém pouco altera a absorção de água e o índice de vazios. Logo, para que o caulim que é descartado por não possuir as características adequadas para a indústria do papel e a cinza volante resultante da queima do carvão mineral na geração de energia possam ser aplicados na construção civil, se faz necessário realizar mais estudos e investigações, seja das formulações adotadas quanto de outras propriedades do material.

REFERÊNCIAS

1. BBC NEWS. **Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba**. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 14 dez. 2019.

2. CARNEIRO, B. et al. Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará. **Cerâmica**, v. 49, p. 237-244, 2003.

3. DOS SANTOS, S. C. A. et al. Caulins amazônicos: Possíveis materiais de referência. **Cerâmica**, v. 59, n. 351, p. 431–441, 2013.

4. LING, Y. et al. Effects of mix design parameters on heat of geopolymerization, set time, and compressive strength of high calcium fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116763, 2019.

5. PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. **Alkali Activated Materials**. [S. l.]: RILEM State-of-the-Art Reports, 2014. v. 13. ISBN 9789400776715.

6. TEMUUJIN, J. et al. **Processing and uses of fly ash addressing radioactivity (critical review).** Chemosphere, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.112>. Acesso em: 19 dez. 2019

7. BRITO, W. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, [S. l.], 2018.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2011.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: Rio de Janeiro, 2018.

10. IBRAHIM, M.; MASLEHUDDIN, M. An overview of factors influencing the properties of alkali-activated binders. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 124972, 2021.

11. BERNAL, S. A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; PROVIS, J. L. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 99–108, 2012.

12. PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications**. 1° ed. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2009.

13. EN 1504-3. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair. **European Standards**, 2006.

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE CINZA VOLANTE DE MINÉRIO DE CARVÃO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081146

BICA; BRUNO O.[1]; PADILHA; FRANCINE[2]; ROCHA; JANAÍDE[3]; GLEIZE; PHILIPPE[4]
[1234]UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: BRUNOBICA01@GMAIL.COM

RESUMO: O trabalho propõe a utilização de cinza volante proveniente de carvão mineral como substituição parcial aos agregados de uma argamassa convencional produzida com cimento Portland CP-IV. Além da caracterização dos materiais, foram conduzidos ensaios nas pastas e na argamassa nos estados fresco e endurecido. A adição retardou o início das reações cinéticas de hidratação e aumento aproximadamente 36% o tempo de início de pega Observou-se aumento de 27,3% na resistência à compressão e de 12,27% na resistência à tração na flexão. Os resultados demonstraram que a substituição parcial da areia pela cinza foi benéfica ao desempenho mecânico das matrizes estudadas.

PALAVRAS-CHAVES: Cinza volante, argamassa, resíduos.

ABSTRACT: The work proposes the use of fly ash from coal as a partial replacement for the aggregates of a conventional mortar produced with CP-IV Portland cement. In addition to the characterization of the materials, tests were conducted on pastes and mortar in the fresh and hardened states. The addition delayed the onset of kinetic hydration reactions and increased setting onset time by approximately 36%. An increase of 27.3% in compressive strength and 12.27% in flexural tensile strength was observed. The results showed that the partial replacement of sand by ash was beneficial to the mechanical performance of the matrices.

KEYWORDS: Fly ash, mortar, waste.

1 | INTRODUÇÃO

A industrialização, o crescimento populacional e o acelerado desenvolvimento da infraestrutura das cidades são acompanhados por elevados números de emissão de gases de efeito estufa. Cimento, que é a mercadoria importante da indústria da construção é responsável pela emissão de cerca de 7% destes gases (HAWILEH et. al., 2017; DEGLOORKAR & PANCHARANTHI, 2021).

A utilização de adicionais minerais na composição de matrizes objetiva a diminuição da produção e uso do cimento Portland, dos agregados naturais, além de mitigar os problemas ambientais. O uso de materiais alternativos na construção civil pode tornar a construção civil mais econômica e sustentável (WARDEN, 2005).

Adicionalmente, a utilização de resíduos minerais, como a cinza volante, pode promover expressivos ganhos nas propriedades das pastas e argamassas de cimento Portland: melhorias na trabalhabilidade, aumento da atividade pozolânica, densificação

da microestrutura e consideráveis ganhos de resistência em ensaios mecânicos.

Neste cenário, o Brasil produzir cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas volantes (provenientes do minério do carvão) anualmente. A descarga ambientalmente inadequada desse material causa sérios riscos à saúde por inalação de material particulado fino, influenciando, por exemplo, no mecanismo de reparo do DNA e formação de espécies orgânicas reativas, e à poluição ambiental (MATZENBACHER et al., 2017).

Diante disso, o uso de resíduos oriundos e a consequente redução na produção e uso do cimento Portland pode reduzir a emissão de gases nocivos e produzir significativos benefícios ambientais. Gartner & Sui (2018) e John et al. (2021) ressaltam a necessidade do emprego de ligantes alternativos para reduzir a emissão de dióxido de carbono e pegada de carbono. Por isso, diferentes tecnologias e materiais de diferentes naturezas que possibilitem a produção de materiais alternativos, mas igualmente eficientes estão no radar de interesses industriais e acadêmicos.

Nesse contexto, a pesquisa busca caracterizar de forma físico-química uma cinza proveniente de resíduo de carvão e analisar sua influência em ensaios de pastas e argamassas nos estados fresco e endurecido.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

O teor de substituição do agregado miúdo por cinza volante de minério de carvão foi estabelecido em 1/7 ou 14,29%. O teor foi adotado para que a cinza adicionada na mistura tivesse a mesma proporção de cimento utilizado e para verificar a influência dessa substituição nas propriedades mecânicas da argamassa. Para tanto, foram realizados ensaios de índice de consistência, tempo de pega, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e reatividade.

2.1 Materiais e métodos

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland CP IV-32 com massa específica igual a 3,10 g/cm³. As composições químicas do cimento Portland e do resíduo (cinza volante de minério de carvão) foram obtidas por espectrometria de fluorescência por raios-X. O ensaio foi realizado com o equipamento EDX-7000 pertencente ao laboratório ValoRes da Universidade Federal de Santa Catarina. Identificou-se óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO2) como os principais componentes químicos do cimento. Estes representam, respectivamente, 51,44% e 31,12% da composição do material. Outros óxidos como o óxido de alumínio (Al2O3) e óxido férrico (Fe2O3) representam cerca de 13,56%. Já o resíduo é formado principalmente por sílica (63,48%) e alumina (23,64%). Ainda, é possível destacar a presença de óxido de cálcio (1,74%), óxido de potássio (3,64%) e óxidos de ferro (4,81%).

A distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia fina natural) e do resíduo foi obtida através da NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 1 apresenta um gráfico comparativo da granulometria destes materiais.

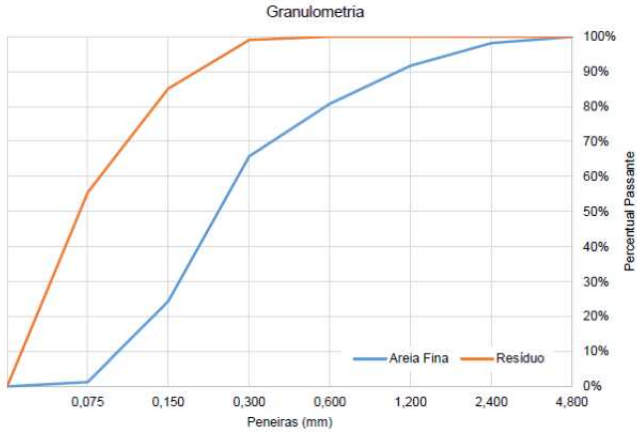


Figura 1 – Granulometria dos materiais

Fonte: Autores

A massa específica do agregado miúdo e do resíduo foram obtidas pelo método do picnômetro e possuem valores médios de 2,72 g/cm³ e 2,25 g/cm³, respectivamente.

Também foram realizados ensaios para determinar a superfície específica dos materiais, de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015), utilizando o Método de Blaine. A porosidade de 0,5 foi utilizada para o cálculo e tempo medido foi de 67,15 segundos para o cimento e 14 segundos para o resíduo. Assim, a superfície específica do cimento resultou em 3786,33 cm²/g e do resíduo 2425,09 cm²/g.

Foi utilizado um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos na confecção das argamassas. O uso do aditivo químico visou compensar a eventual perda na trabalhabilidade das argamassas produzidas.

Para a produção das argamassas foi adotado um traço de referência de 1:7 e relação a/c de 0,5 e um traço com substituição parcial do resíduo. A adição de superplastificante foi realizada conforme a necessidade da mistura para atingir um espalhamento pré-definido de 225 ± 20 mm. Assim, foram produzidas duas misturas: Mistura REF 1:7 (cimento:areia) e Mistura RES 1:1:6 (cimento:resíduo:areia).

Na mistura RES, substituiu-se parte da areia por resíduo, entretanto, manteve-se a relação volumétrica de agregado miúdo (areia+resíduo) em relação a argamassa de referência (REF). Também houve a necessidade de aumentar a relação a/c inicial para 0,7 na mistura RES por esta exigir uma maior quantidade de água para que fossem mantidas as características de coesão, homogeneidade e trabalhabilidade. A Tabela 1 exibe o quantitativo de materiais utilizados na produção dos CPs prismáticos com e sem resíduo.

Argamassa	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (g)	Aditivo (g)
REF	310	1904	0	217	12,4
RES	310	1586,67	317,67	217	15,5

Tabela 1 – Quantitativo de materiais na confecção das argamassas

Para determinar os tempos de pega e verificar a influência do resíduo, aplicou-se os procedimentos descritos na norma NBR 16606 (ABNT, 2018) e NBR 16607 (ABNT, 2018) utilizando o aparelho de Vicat.

As moldagens foram feitas de acordo com NBR 5738: 2015. Foram utilizados corpos de prova confeccionados em formas prismática com dimensão 40x40x160mm para os ensaios de tração na flexão e compressão. Já para o ensaio de reatividade foi utilizado corpos de prova cilíndricos de 50x100mm, de acordo com a norma NBR 5752: 2014. Os CP's prismáticos permaneceram em caixa de isopor com sua superfície exposta protegida com pedaço de vidro durante 24 horas, a fim de evitar a perda de água da mistura para o ambiente externo. Os CP's cilíndricos foram mantidos em um tanque com água e cal, dentro da câmara úmida até os 28 dias de cura.

A resistência a tração na flexão foi realizada em três amostras para cada mistura utilizando CPs prismáticos de dimensões iguais a 40x40x160 mm para 28 dias de idade de cura. O ensaio seguiu o normatizado pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005). Para tanto, foram utilizadas as metades dos CPs do ensaio de resistência à tração na flexão.

O ensaio de reatividade foi realizado de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). Para o ensaio foram produzidas duas misturas, uma composta por 100% de Cimento Portland, areia e água (REF) e outra composta por 75% de Cimento Portland e 25% de resíduo, areia e água. Foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100m de altura para cada mistura com idades de 28 e 63 dias.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Índice de consistência

As duas argamassas atingiram o espalhamento inicialmente estabelecido. A média de espalhamento para argamassa REF foi de 229 mm e para argamassa RES de 234,3 mm. Esta última exigiu maior teor de aditivo superplastificante. O aumento do teor de aditivo ocorreu devido as partículas de resíduo serem menores e apresentarem maior área de contato que as partículas da areia, retendo mais água e diminuindo a trabalhabilidade.

3.2 Tempo de pega

Na pasta com resíduo foi incorporado apenas a parcela mais fina do material (passante pela peneira 0,075mm). O tempo de início de pega obtidos foram de 289 min para argamassa REF e 395 min para argamassa RES. A Figura 2 apresenta o gráfico das

leituras do ensaio de tempo de pega nas pastas e sua tendência de comportamento para um intervalo de 0 a 784 minutos (valor máximo estipulado pela polinomial de tendência).

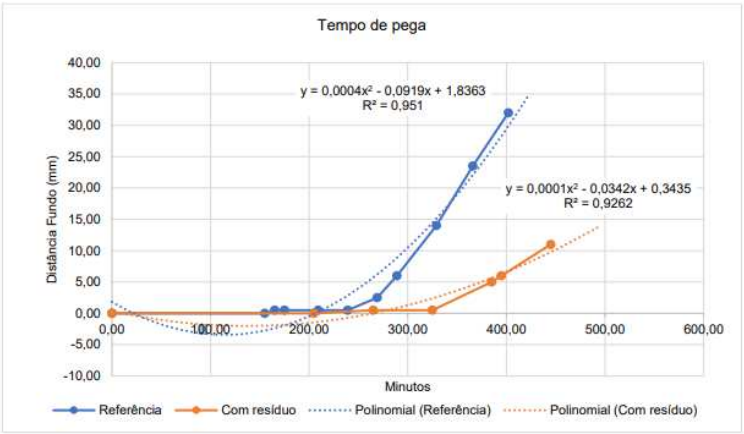


Figura 2 – Resultado do ensaio de tempo de pega

Fonte: Autores

O tempo final da pega pode ser estipulado através da polinomial de tendência apresentado na Figura 2. Dessa forma, os tempos finais de pega foram estipulados em 424 min para a argamassa REF e 784 min para argamassa RES. A adição da cinza funcionou como um retardante no início das reações cinéticas de hidratação da pasta, aumentando em aproximadamente 36% o tempo de início de pega. O tempo do fim de pega não pode ser mensurado. Ressalta-se, entretanto, que os valores também podem ter sido diretamente influenciados pela utilização de aditivo superplastificante.

3.3 Resistência à tração na flexão

Os valores médios obtidos de resistência para esse ensaio estão apresentados na Tabela 2.

Argamassa	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
REF	2,77	0,08	2,81
RES	3,11	0,18	5,91

Tabela 2 – Resistência média à tração na flexão

O resíduo proporcionou um aumento de resistência de 12,27% em relação a argamassa de referência. A incorporação de resíduos nas matrizes cimentícias aumentou a quantidade de componentes ligados diretamente com a formação dos produtos de hidratação da pasta, como alumina e sílica, o que pode ter favorecido ao ganho de

resistência observado. Ainda, devido sua granulometria mais fina, as partículas da cinza volante preenchem os poros das argamassas, densificando sua matriz cimentícia e, consequentemente, melhorando seu desempenho mecânico. Assim como observado nos resultados dos tempos de pega, a adição de superplastificante nas misturas podem ter influenciado nos valores dos ensaios de resistência à tração.

3.4 Resistência à compressão simples

Os resultados obtidos, exibidos na Tabela 3, apresentaram a mesma tendência que os valores encontrados no ensaio de resistência a tração na flexão.

Argamassa	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
REF	9,41	0,54	5,79
RES	11,98	0,32	2,65

Tabela 3 – Resistência média à compressão simples

A incorporação do resíduo melhorou a resistência a compressão em torno de 27,31% em relação a argamassa de referência. Assim como observado nos resultados de tração na flexão, os melhores resultados da argamassa com adição do resíduo devem-se principalmente a maior quantidade de produtos de hidratação do cimento e a maior densificação das matrizes cimentícias devido ao tamanho das partículas da cinza. O uso do superplastificante pode ter sido fator determinante no aumento da resistência à compressão das argamassas através do aumento da fluidez e coesão das argamassas.

3.5 Reatividade (índice de desempenho)

Os resultados obtidos no ensaio de reatividade são mostrados pela Tabela 4.

Idade	Argamassa	Resistência média (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
28 dias	REF	12,41	0,08	0,63
	RES	10,78	0,37	3,41
63 dias	REF	17,39	0,71	4,07
	RES	16,48	0,45	2,75

Tabela 4 – Resistência média à compressão no ensaio de reatividade

A substituição do cimento por 25% do resíduo reduziu a resistência das argamassas. Entretanto, a partir da média das resistências à compressão foi calculado o índice de desempenho do material, resultando em 87% aos 28 dias e 95% aos 63 dias.

Pode-se afirmar, a partir dos resultados obtidos, que a mistura com 25% de resíduo apresentou desempenho mecânico coerente. Tal fato indica que este resíduo pode apresentar atividade pozolânica devido sua incorporação ter diminuído as resistências

em apenas 13% aos 28 dias e apenas 5% aos 63 dias em relação a argamassa referência. Assim, supõem-se que a cinza, bem como o cimento CP IV, ganham resistência ao longo do tempo, praticamente igualando os resultados obtidos da argamassa referência com a argamassa com resíduo em idades mais avançadas.

4 | CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos no programa experimental proposto, a pesquisa obtive as seguintes conclusões:

- A adição da cinza funcionou como um retardante no início das reações cinéticas de hidratação da pasta, aumentando em aproximadamente 36% o tempo de início de pega. O tempo do fim de pega não pode ser mensurado.
- A necessidade de maior quantidade de aditivo nas pastas RES, para atingir abertura semelhante à da pasta referência, ocorreu devido as partículas de resíduo serem menores e apresentarem maior área de contato que as partículas da areia.
- Foi observado um acréscimo de 27,3% na resistência à compressão e de 12,27% na resistência à tração na flexão das argamassas. Isso pode indicar que a substituição parcial da areia pela cinza foi benéfica quanto ao desempenho mecânico das matrizes cimentícias. O uso do superplastificante pode ter influenciado no aumento da das resistências devido aos efeitos benéficos na fluidez e coesão.
- Durante os ensaios de reatividade, houve uma diminuição da resistência à compressão em torno de 13% das amostras. A redução foi considerada pequena e os resultados indicam um bom nível de atividade pozolânica do resíduo.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido**. Rio de Janeiro, 2004.

2. 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.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2018.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2003.

9. DEGLOORKAR, N. K.; PANCHARATHI, R. K. **Use of particle packing methods for development of lime fly ash-based mortars for repair of heritage structures**. Materials Today: Proceedings. India, 2021.

10. GARTNER, T.; SUI, T. **Alternative cement clinkers**. Cement Concrete Resistence. 114, 27–39, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002. 2018

11. HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A.; FARDMANESH, F.; SHAHSANA, P.; KHALILI, A. **Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement**, Arch. Civ. Mech. Eng. 17 (3) 511–519, 2017.

12. MATZENBACHER, C. A. et al. **DNA damage induced by coal dust, fly and bottom ash from coal combustion evaluated using the micronucleus test and comet assay in vitro**. Journal of hazardous materials, v. 324, p. 781-788, 2017.

13. SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G. **Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites**. Cement and Concrete Composites, v. 27, n. 5, p. 517, maio 2005. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504001556.

14. SHAISE, K.; JOHN, Y. N.; GIRIJA, K. **Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review.** Construction and Building Materials. 280. 122443, India, 2021.



ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO QUARTZOSO POR AGREGADO MIÚDO DE BRITAGEM DE ROCHA BASÁLTICA EM CONCRETO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081147

WALKER; WESLEY RAMON[1]; MEINHART; ALICE HELENA[1]; ARNOLD; DAIANA CRISTINA METZ[1]; DIAS; LETÍCIA ANDRIOLLI[1]
[1]UNIVERSIDADE FEEVALE
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ALICEHMEI@GMAIL.COM

RESUMO: Analisou-se os efeitos da substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo de britagem (AMB). Definiu-se um traço referência e substituições de 25% e 50% do AMN pelo AMB, mantendo relação água/cimento fixa. Nos resultados, o traço 50/50 obteve elevação de 1,56% e 34,66% da resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, respectivamente, aos 28 dias, em relação a amostra sem substituição. Sendo assim, a amostra 50/50 mostrou-se mais promissora quanto a análises de compressão.

PALAVRAS-CHAVES: Agregado miúdo natural; agregado miúdo de britagem; concreto.

ABSTRACT: The effects of replacing the fine natural aggregate (FNA) by the fine crushed aggregate (FCA) were analyzed. A reference mix and 25% and 50% substitutions of FNA by FCA were defined, maintaining a fixed water/cement ratio. In the results, the 50/50 mix obtained an increase of in 1.56% and 34.66% in the resistance to axial compression and traction by diametral compression, respectively, at 28 days, in relation to reference mix. Thus, the 50/50 sample proved to be more promising compared to the others regarding compression analyses.

KEYWORDS: Natural fine aggregate; fine crushed aggregate; concrete.

1 | INTRODUÇÃO

A extração de agregado miúdo natural (AMN) é feita através de dragas dispostas nos leitos dos rios que fazem a retirada do AMN do fundo das águas, causando morte de espécies aquáticas e microrganismos do ambiente, além de erosão das margens dos rios e a modificação de seu curso natural[(1)]. Já o agregado miúdo britado basáltico (AMB) é um material obtido a partir do processo de cominuição de rochas, comumente chamado de areia de britagem (AB), constituída por grãos passantes na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retidos na peneira de abertura de malha 150 µm[(2)], e surge como alternativa analisada por pesquisadores como substituição do AMN em concretos [(3,4,5)].

Santos *et al.*[(5)] ao realizarem substituições de 25%, 50% e 75% do AMN pelo AMB, observaram a resistência à compressão aos 28 dias de 24,14 MPa, 21,03 MPa e 20,6 MPa, respectivamente. Os autores atrelam a diminuição da resistência à elevação do teor água/cimento (a/c), já que este foi alterado conforme acrescido o teor de AMB, e também ao aumento da superfície específica do AMB e da forma do grão, que por ser lamelar, dificultaria

a coesão da mistura. Já Araújo *et al.*[3] ao estudarem a substituição do AMN pelo AMB em concretos de alta resistência, adicionaram metacaulim à mistura, para preencher os vazios e aprimorar o empacotamento dos grãos do traço. Os autores realizaram a substituição do AMN em 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% e constataram aumento de 22,25% na resistência à compressão para o traço com 15% de substituição, quando comparado com o traço sem substituição, porém, também foi evidenciado diminuição na resistência a partir desse teor, chegando a 19,97% para o traço com 30% de substituição.

Para a mesma relação a/c de 0,50, Hammes *et al.*[4] realizaram a substituição de 35% do AMN pelo AMB de rocha basáltica, obtendo abatimento de 90 mm e 52,66 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Os autores relatam que conforme elevou-se o teor de substituição, foi necessária maior quantidade de água na mistura para manter a trabalhabilidade e, em conclusão, sugerem o uso de aditivos e associam o aumento da demanda de água à forma dos grãos e ao alto teor de finos do AMB, já que este absorve água da mistura, concordando com Araújo *et al.*[3]. Contudo, a partir da incorporação do AMB, a mistura fica mais densa e coesa, propiciando diminuição dos índices de vazios devido ao alto teor de finos, chegando a um abatimento de 84 mm com 25% de substituição do AMB e 115 mm para amostra sem AMB[4].

Após revisão bibliográfica, elaborou-se o programa experimental para analisar a influência da substituição do AMN pelo AMB de rocha basáltica sem prensença de filer basáltico. Para isso foi realizado o processo de empacotamento das partículas, além da reprodução de traços de concretos comerciais utilizados em uma concreteira situada na região do Vale do Sinos (RS).

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para reprodução dos traços de concreto, utilizados pela concreteira, mas reproduzidos neste estudo em escala laboratorial, utilizou-se cimento, agregado graúdo basáltico, agregado miúdo natural, agregado miúdo de britagem de rocha basáltica e aditivo superplastificante. Todos os materiais passaram pelo processo de caracterização no laboratório de técnicas construtivas da Universidade Feevale (LABTEC).

2.1 Caracterização dos materiais

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland composto CP II – F40. A água utilizada para o amassamento apresentou pH 7,75, e o aditivo superplastificante à base de policarboxilato foi utilizado com objetivo de melhorar a trabalhabilidade dos traços, mantendo a relação a/c fixa. O AMN utilizado nos traços de concreto, foi obtido através da mistura de dois tipos de agregados miúdos: o agregado miúdo extraído dos leitos dos rios (AM Rio), que apresenta distribuição granulométrica com partículas de maiores dimensões e o agregado miúdo obtido de cavas no continente (AM Cavas), que apresenta uma distribuição granulométrica com dimensões de grãos menores, ambos sendo agregados quartzosos. Então, realizou-se o ensaio de empacotamento dos grãos, similar a executado por Gomes e Barros[6], onde avaliou-se a mistura com menor índice de vazios e maior densidade de massa. Como resultado, chegou-se em uma composição ideal de 82% de AM Rio e 18% de AM Cava. O AMB e o agregado graúdo (AG) foram obtidos através da britagem de rochas basálticas. Após secos em estufa (105°C ± 5°C), até constância de massa, foram realizados ensaios de composição granulometrica para

todos os agregados utilizados na pesquisa.

O agregado graúdo (AG) trata-se de uma composição entre o AG tipo 0 (com diâmetro máximo de grãos de 9,5 mm) e AG tipo 1 (com dimensão máxima de grãos de 19 mm), ambos derivados de rocha basáltica. A composição granulométrica dos agregados graúdos foi realizada a partir do empacotamento de grãos.

2.2 Métodos de ensaio

Para a produção do concreto, baseou-se no traço de fck = 30 MPa, utilizou-se o método de dosagem característico da concreteira em estudo, onde foi incorporado os princípios de empacotamento e compacidade dos grãos, seguindo a distribuição das curvas granulométricas, além da bombeabilidade da mistura, metodologia similar com o método apresentado por Gomes e Barros[6]. Para isso, estabeleceu-se duas composições, 75/25 (com 75% de AMN e 25% de AMB) e 50/50 (50% de AMN e 50% de AMB), além do traço de referência (REF) que contém somente AMN, conforme Tabela 1. Para cada ensaio foram utilizados 3 corpos de prova, onde a média aritmética destes foi empregada como valor de cálculo da amostra.

Traço	*Relação a/c*	*Cimento (kg)*	*AMN (kg)*	*AMB (kg)*	*AG (kg)*	*Água (kg)*	*Aditivo (g)*	*a/c*
REF	0,7	8,60	29,75	-	32,68	6,01	88,00	0,7
75/25	0,7	8,60	22,32	7,44	32,68	6,01	31,09	0,7
50/50	0,7	8,60	14,88	14,88	32,68	6,01	82,00	0,7

Tabela 1 – Composição dos traços

Fonte: autores (2021).

Para análise das propriedades dos concretos produzidos, no estado fresco, foi realizado o ensaio de slump. A cura foi feita em câmera umida com temperatura controlada de 23°C. Já no estado endurecido aos 7 e aos 28 dias de cura foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial[7], em prensa com aplicação de carga de 2000 kN e velocidade constante de aplicação (0,45 MPa/s), e resistência à tração por compressão diametral[8], na mesma prensa, com carga aplicada de velocidade constante (0,05 MPa/s) até a ruptura. Por fim, o ensaio de absorção de água total foi executado conforme a NBR 9778:2009[9], onde mediram-se as massas dos CPs para determinação de absorção de água das amostras e o índice de vazios.

3 | RESULTADOS

Este tópico subdivide-se na análise da composição granulométrica dos agregados utilizados nos traços, além dos resultados dos ensaios em estado fresco e endurecido dos concretos produzidos. Quanto a densidade percebeu-se aumento de 2,3% e 5% das composições 75/25 (2,68 g/cm³) e 50/50 (2,75 g/cm³), respectivamente, em comparação a amostra contendo apenas AMN (2,62 g/cm³). Não obstante, foi realizado a distribuição granulométrica dos grãos, a fim de analisar a comparação do comportamento das curvas

de distribuição granulométrica de cada composição, conforme a Figura 1.

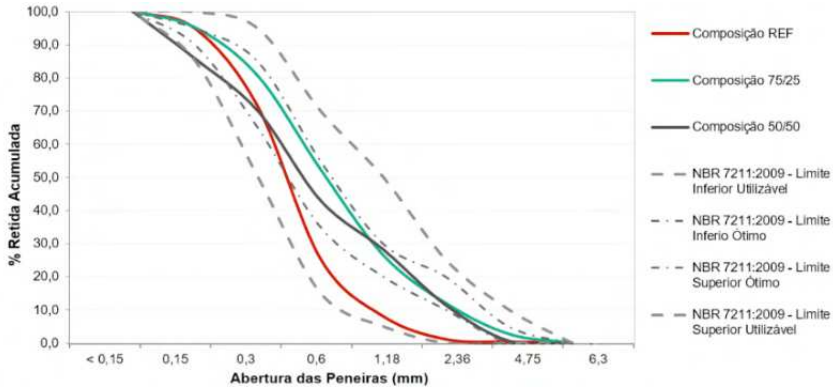


Figura 1 – Distribuição granulométrica das composições

Fonte: autores (2021).

Verificando a distribuição conforme a NBR 7211: 2009[10], nota-se que a composição REF tendencia ao limite inferior utilizável, enquanto a composição 50/50 apresentou comportamento introdutório dentro do limite utilizável partindo para o limite ótimo seguidamente. Já a composição 75/25 manteve-se dentro dos limites ótimos preconizados pela NBR 7211: 2009[10], sendo esta a composição que apresenta comportamento favorável ao melhor empacotamento das partículas e a melhor distribuição granulométrica para ser utilizada em concretos.

3.1 Ensaios no estado fresco do concreto

No ensaio de abatimento das amostras nota-se que a maior quantidade de aditivo empregada a mistura deu-se no traço REF, com 35,29% a mais de aditivo do que o traço 75/25, sendo este, o traço com menor incorporação de aditivo em comparação aos demais, demonstrando melhor trabalhabilidade do traço comparado aos demais, resultado contrário ao encontrado por Drago *et al.*[11], possivelmente devido a diferenças entre o aglomerante utilizado pelos autores com o da presente pesquisa, o qual incorpora fíler ao cimento Portland, melhorando a trabalhabilidade do concreto sem necessitar aumento de água. Araújo *et al.*[3] observaram redução de 38,26% no índice de consistência ao substituir 30% do AMB de rocha basáltica pelo AMN ao comparar com REF, e evidenciam que essa perda de trabalhabilidade pode ter relação com a absorção de água dos agregados.

3.2 Ensaios no estado endurecido do concreto

Ao ensaiar a densidade do concreto endurecido, aos 28 dias, obteve-se médias de 2,28 g/cm³, 2,30 g/cm³ e 2,32 g/cm³ para amostras REF, 75/25 e 50/50, respectivamente. A partir disso, observa-se aumento contínuo na densidade do concreto conforme aumenta-se o percentual de substituição. Quanto a absorção de água total e índice de

vazios, apresentam-se na Figura 2, os resultados médios das amostras e o desvio padrão.



Figura 2 – Absorção de água total e índice de vazio dos concretos analisados

Fonte: autores (2021).

Nota-se o aumento na absorção de água e índice de vazios quando o AMN é substituido pelo AMB, fato que pode ser explicado através da diferença no módulo de finura (MF) das composições: a composição REF possui o menor valor (MF=2,01), seguida pelas composições de 75/25 (MF=2,19) e 50/50 (MF=2,39), comprovando o evidenciado por Drago *et al.*[11], onde os autores obtiveram aumento de 27% na absorção de água quando realizado a substituição do agregado miúdo natural.

Quanto a análises de resistência, os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral[8] apresenta-se na Figura 3.



Figura 3 – Resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias

Fonte: autores (2021).

Verifica-se na Figura 3 aumento da resistência à tração conforme eleva-se a substituição do AMN pelo AMB, corroborando com estudos de Hammes *et al.*[4] e Santos *et al.*[5], mesmo estes tendo evidenciado diminuição da resitência à tração conforme eleva-se o teor de substituição do AMB acima de 50%. Essa diferença pode justificar-se através da forma de obtenção dos agregados miúdos britados e processo de beneficiamento dos grãos. Salienta-se que para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, quanto mais fibrilares e lamelares forem os agregados, melhores serão as resistências.

Quanto a resistência à compressão axial, a Figura 4 apresenta média do resultado de três corpos de prova ensaiados quanto à resistência potencial obtida em cada traço, este último conforme especificado pela norma NBR 12655:2015[12].



Figura 4 – Resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias

Fonte: autores (2021).

O concreto que apresentou a menor resistência nominal, para 7 e 28 dias, foi o traço 75/25. Já aos 28 dias, percebe-se que o traço de 50/50 atingiu resistência à compressão dentro do desvio padrão da amostra de referência, ainda sim apresentando resultado satisfatório, corroborando com o encontrado por Hammes *et al.*[4] e Sadek *et al.*[13].

4 | CONCLUSÕES

O adequado empacotamento dos grãos e a curva de distribuição granulométrica dentro dos limites preconizados pela NBR 7211:2009[10] favorecem o melhor desempenho mecânico dos concretos. A substituição de AM por AMB elevou a resistência à tração na flexão a medida que a massa unitária da composição dos grãos também aumentou, além da substituição 50/50 obter resultados dentro do desvio padrão relativo a resistência à compressão da REF, demonstrando eficiência na dosagem de concretos por empacotamento de grãos e ajustes na distribuição granulométrica dos mesmo, mesmo não sendo perceptível redução do índice de vazios a medida que o AMB foi utilizado nos concretos.

Entende-se, por fim, que a substituição de 50% do AMN pelo AMB atingiu o valor de resistência à compressão axial mais próximo a amostra de referência nas duas idades analisadas, assim como resultado 34,66% maior na tração por compressão diametral em relação a REF, comprovando que o empacotamento dos grãos teve relevância para o estudo, mesmo esta não tendo sido a fração que apresentou melhor comportamento nas curvas de distribuição granulométrica (Figura 1), mas que obteve comportamento introdutório dentro do limite utilizável partindo para o limite ótimo seguidamente. A partir disso, conclui-se que há viabilidade de produção de concretos com a substituição do AMN pelo AMB, sendo possível a concreteira fazer utilização da substituição parcial, mantendo a trabalhabilidade e a bombabilidade dos concretos produzidos.

REFERÊNCIAS

1. LELLES, L. C.; SILVA, E.; GRIFFITH, J. J.; MARTINS, S. V. **Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d' água**. R. Árvore, Viçosa-MG, v. 29, n. 3, p. 439-444, 2005.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

3. ARAÚJO, W.M.P. de; TORRES, V.L; SANTOS, M.D.O; SOUZA, B.H.P. de; SILVA, M.A.M; SANTOS, H.C. dos; Utilização de areia de britagem em substituição à areia natural do concreto de alta resistência. Ln: **60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 2018, Foz do Iguaçu. PR. Anais. Foz do Iguaçu, PR: IBRACON, 2018.

4. HAMMES, R. F; HUPPES, F. A. H; VIER, L. C; BALZ, A; ANGELONI, P. D; PEDROZO, É. C: Estudo da influência da substituição da areia natural por pó de pedra na produção do concreto. Ln: **60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 2018, Belo Foz do Iguaçu, PR. Anais. Foz do Iguaçu, PR: IBRACON, 2018.

5. SANTOS, B.S. dos; RAMALHO NETA, D.S; OLIVEIRA, N.K.A; NASCIMENTO, R.F. de; FIGUEIREDO, S.S.; BATISTA, L.S; Estudo da utilização de pó de pedra em substituição parcial a areia como agregado miúdo. Ln: **60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 2018, Foz do Iguaçu, PR. Anais. Foz do Iguaçu, PR: IBRACON, 2018.

6. GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Método de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009. 165p.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

8. 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: ABNT, 2011.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

11. DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. REM: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 399-408, jul./set. 2009.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro. ABNT, 2015.

13. SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Clener Production**. 121, p. 19-32, 2016.

AVALIAÇÃO DO RESÍDUO DE ARENITO COMO AGREGADO MIÚDO EM MATRIZ DE ARGAMASSA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081148

MARIO, MAURO[1]; GIORDANI, CAROLINE[1]; MASUERO, ANGELA BORGES[1]; DAL MOLIN, DENISE CARPENA COITINHO[1]
[1]PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E INFRAESTRUTURA (PPGCI/UFRGS)
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MAUROMARIO87@GMAIL.COM

RESUMO: O trabalho objetiva avaliar o resíduo de arenito amarelo e vermelho como agregado miúdo, comparativamente com areia silicosa de rio. Os resíduos foram caracterizados quimica e mineralogicamente. Os finos do arenito vermelho não apresentaram atividade pozolânica com cal. Para avaliação em argamassas cimentícias, foi variada a coloração do arenito (vermelho e amarelo) e o tratamento dos agregados (com e sem lavagem). Os dois arenitos apresentaram características químicas semelhantes, porém, foi possível verificar diferença na resistência à compressão. Todas as argamassas apresentaram valores similares com relação à absorção de água por capilaridade e resistência à tração na flexão.

PALAVRAS-CHAVES: Arenito, resíduo, agregado miúdo, argamassa.

ABSTRACT: The aim of this work is to evaluate yellow and red sandstone residues as fine aggregate, compared to siliceous river sand. The residues were chemically and mineralogically characterized. The red sandstone fines showed no pozzolanic activity with lime. For evaluation in cementitious mortars, the color of the sandstone (red and yellow) and the treatment of the aggregates (with and without washing) were varied. Both sandstones had similar chemical characteristics, however, it was possible to verify differences in compressive strength. All mortars presented similar values for capillary water absorption and flexural tensile strength.

KEYWORDS: Sandstone, residue, fine aggregate, mortar.

1 | INTRODUÇÃO

O arenito é uma rocha sedimentar porosa, constituída por partículas de quartzo (SiO_2) unidas por sílica amorfa, óxido de ferro ou carbonatos, além de estarem presentes argila ou silte(1). De origem eólica, o Arenito Botucatu se encontra na Bacia do Paraná, abaixo da Formação Serra Geral, e aflora, no Rio Grande do Sul, na parte Sul do Rio dos Sinos(2).

O arenito pode ser utilizado na construção civil em alicerces, vedação vertical, muros e revestimentos de piso e parede. Porém, além de suprimir a vegetação e modificar visualmente o ambiente, a falta de planejamento e de profissionais técnicos para a extração e beneficiamento do arenito acarretam uma elevada produção de

rejeitos, os quais são acumulados sobre a vegetação ou nos corpos hídricos[2].

O resíduo gerado possui propriedades que podem atender aos requisitos para uso como agregado miúdo em argamassas ou concretos, após britagem para redução das dimensões. Esta substituição poderia vir a diminuir a necessidade de mineração de areia em leitos de rios e em cavas, bem como oferecer destinação para o rejeito da extração de arenito, a qual é realizada em quantidade elevada na região Sul do Brasil.

Em pesquisa anterior[3], o arenito, obtido na mesma pedreira deste trabalho, foi britado até a dimensão de agregado miúdo e utilizado diretamente em argamassas de cimento. Foram obtidos resultados semelhantes ou mais elevados que a argamassa de referência (constituída por areia) para a resistência mecânica, absorção por capilaridade e módulo de elasticidade. Porém, o elevado teor de finos demandou elevada quantidade de aditivo superplastificante.

Portanto, nesta pesquisa objetiva-se avaliar argamassas de cimento (traço 1:4,5, em massa) com areia silicosa de rio (referência) comparando-a com dois tipos de arenito (vermelho e amarelo), submetidos a dois tratamentos diferentes (apenas peneirado e peneirado com lavagem), sendo todos os agregados compostos em frações iguais dos grãos de 0,15mm, 0,3mm, 0,6mm e 1,2mm.

2 | METODOLOGIA

2.1 Coleta, caracterização e beneficiamento do arenito

O arenito foi coletado em uma pedreira de porte médio localizada na região de Taquara/RS, a 62 km da cidade de Porto Alegre/RS. O material é extraído para produção de blocos para alicerces e muros, gerando resíduos de granulometria variável, de grandes dimensões a pequenos fragmentos. Esta fonte possui o arenito nas colorações vermelho e amarelo, ambos coletados para avaliação.

De forma a caracterizar o resíduo química e mineralogicamente, foram realizados os ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX) do material sem lavagem, cominuído até passagem completa na peneira 0,075mm. Com as partículas finas, passantes através da lavagem do resíduo sobre a peneira 0,075mm e secas em estufa, foi realizado o ensaio de FRX e a determinação do índice de atividade pozolânica com cal, conforme a NBR 5751[4], sendo este último experimento executado apenas com o arenito vermelho.

Utilizando-se um pistilo e almofariz, os fragmentos do resíduo foram desagregados até a ordem de grandeza de agregado miúdo, para sua utilização em argamassa. Parte do material foi diretamente peneirado nas aberturas de malha de 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm para posterior composição. Uma segunda parte passou pela etapa de lavagem com água do material sobre as mesmas peneiras, de maneira a retirar particulados finos aderidos ao redor dos grãos.

Os agregados miúdos foram compostos por 25% de cada fração obtida, para cada tipo de arenito (amarelo e vermelho) e tratamento (sem e com lavagem). Estes foram comparados com o material de referência, a areia natural silicosa originária de leito de rio, composta com os mesmos teores das mesmas frações granulométricas que os

arenitos. Todos os materiais passaram por secagem em estufa antes da utilização.

2.2 Moldagem e caracterização da argamassa

As argamassas foram dosadas com o traço 1:4,5, em massa, com o cimento CP II-Z. Além de utilizado em pesquisas anteriores[3], o proporcionamento escolhido corresponde ao utilizado em concretos com baixa resistência, e o elevado teor de agregado miúdo permite identificar o efeito da variação deste material nas propriedades das argamassas. Optou-se por manter-se o índice de consistência em 225±5mm, variando-se a quantidade de água da mistura. A densidade de massa no estado fresco foi caracterizada conforme a NBR 13278[5].

Para cada agregado, foram moldados corpos de prova prismáticos 4cm x 4cm x 16cm, sendo 3 deles para o ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias, conforme NBR 15259[6] e outros 6 para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão aos 7 e 28 dias, segundo a NBR 13279[7]. A cura foi realizada com temperatura de 23°C e umidade relativa de 65%.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do arenito

Para o arenito íntegro moído, tanto no DRX (Figura 1) quanto no FRX (Tabela 1), observa-se a presença elevada de SiO_2 em relação aos demais componentes. O perfil verificado no DRX é cristalino, sem a presença do halo amorfo, que poderia indicar uma possível pozolanicidade do material na presença do hidróxido de cálcio[8]. Este resultado era esperado, visto que esta rocha sedimentar é constituída predominantemente por grãos de quartzo.

Na avaliação por FRX (Tabela 1) entre o arenito íntegro moído e suas partículas finas, nestas últimas observa-se um menor teor de SiO_2, ainda elevado, e maior porcentagem dos outros compostos. Tanto sílica amorfa quanto óxidos de ferro são considerados materiais ligantes das partículas de SiO_2 desta rocha sedimentar, e o óxido de alumínio possivelmente é originado da matriz de argila[1], resultado que é corroborado pela presença de caulinita identificada no DRX, e que também é mencionada em outros trabalhos sobre arenito[9].

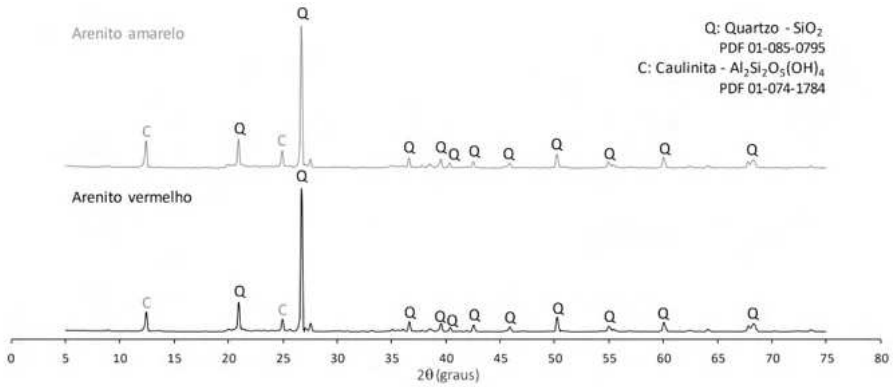


Figura 1 – Composição mineralógica dos arenitos amarelo e vermelho obtida por Difração de Raios X

Fonte: Os autores

Compostos (%)	Arenito vermelho	Arenito amarelo	Finos - vermelho	Finos - amarelo
SiO_2	75,55	77,27	59,58	56,58
Al_2O_3	15,95	14,62	25,47	26,71
Fe_2O_3	1,53	1,22	2,60	2,71
K_2O	2,19	2,03	2,65	2,13
TiO_2	0,33	0,32	0,41	0,55
CaO	0,10	0,21	0,13	0,14
MgO	0,09	0,13	0,12	0,13
P_2O_5	0,07	0,09	0,14	0,14
Outros (<0,1%)	0,10	0,16	0,16	0,16
CO_2	4,10	3,94	8,75	10,75
Total	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**

Tabela 1 – Composição química dos arenitos e dos finos obtida por Fluorescência de Raios X

Fonte: Os autores

O teor de CO_2 elevado nos finos pode ser explicado por uma maior quantidade de matéria orgânica nesta porção do material. A porcentagem dos compostos foi semelhante entre o arenito vermelho e amarelo, tanto para o material íntegro moído, quanto para seus finos.

Com relação ao índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias, a resistência à compressão dos seis corpos de prova atingiu a média de 0,20MPa, com um desvio padrão de 0,04MPa (19% em relação à média). Considerando este resultado, os finos do arenito vermelho não podem ser considerados pozolânicos, visto que não houve o desenvolvimento da resistência mínima de 6MPa, definida pela NBR 12653[10]. Visto a semelhança da composição química observada no FRX, a pozolanicidade dos finos do

arenito amarelo não foi avaliada.

3.2 Caracterização das argamassas

A relação água/aglomerante utilizada na dosagem das argamassas (Tabela 2) foi menor para o agregado miúdo de referência e maior para os resíduos. Os arenitos utilizados após o peneiramento, sem lavagem, exigiram maior quantidade de água para manter constante a trabalhabilidade, possivelmente devido à presença de particulados finos ao redor dos grãos.

A massa unitária das argamassas no estado fresco (Tabela 2) foi menor quando utilizado o agregado de referência, e manteve-se semelhante no caso do uso dos arenitos.

Agregado miúdo	Relação água/aglomerante	Massa unitária no estado fresco (kg/m³)
Referência	0,50	1963,6
Vermelho Lavado	0,59	2049,4
Amarelo Lavado	0,59	2028,2
Vermelho Peneirado	0,67	2036,4
Amarelo Peneirado	0,67	2064,8

Tabela 2 – Relação água/aglomerante e massa unitária no estado fresco das argamassas

Fonte: Os autores

3.3 Ensaios no estado endurecido

O ensaio de absorção de água por capilaridade (Figura 2) apresentou elevada variabilidade e não foi sensível o suficiente para observar-se diferença entre os agregados. Não foi possível calcular a absorção e o coeficiente de capilaridade visto que algumas argamassas obtiveram massas menores após 10 e 90 minutos de ensaio, indicando que pode ter ocorrido evaporação da água pela lateral do corpo de prova. Entretanto, observa-se um comportamento e uma ordem de grandeza da absorção semelhante entre as argamassas com o arenito e com a areia de referência.

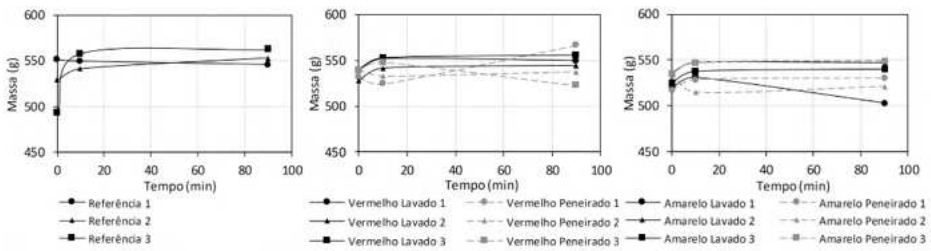


Figura 2 –Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas

Fonte: Os autores

Os resultados dos ensaios de resistência, apresentados nas Figuras 3 e 4, foram submetidos à análise de variância ANOVA, com intervalo de confiança de 95%. As linhas vermelhas, quando contínuas, indicam que as médias dos fatores avaliados podem ser consideradas iguais, resultados estes obtidos através da análise com o Método de Fisher.

Para a resistência à tração na flexão (Figura 3), os fatores isolados idade de ruptura (7 e 28 dias) e tratamento das amostras (lavado ou não), bem como a interação entre eles, afetaram significativamente a variável de resposta, enquanto que a cor do arenito (vermelho e amarelo) não exibiu influência significativa. Os resultados obtidos foram valores baixos, mas, em geral, maiores para as argamassas com arenito em comparação com a de referência.

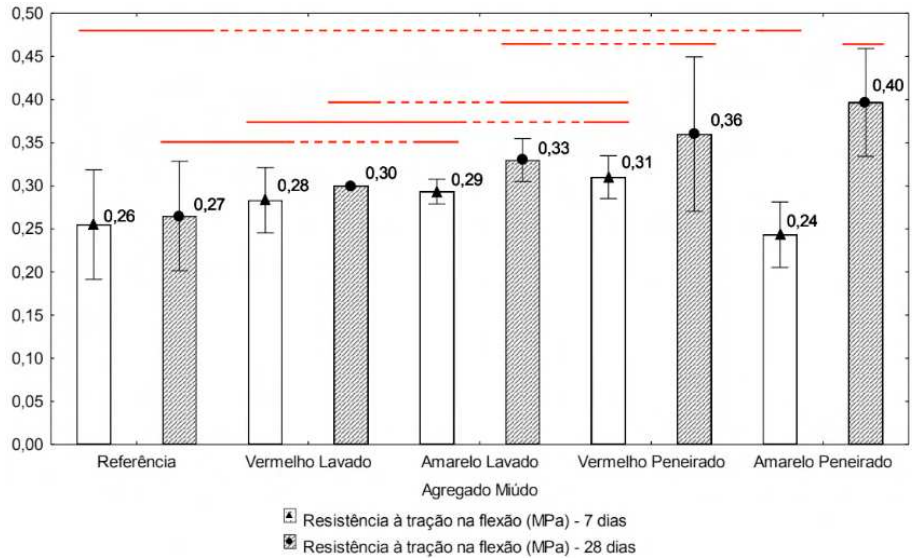


Figura 3 –Resistência à tração na flexão das argamassas e indicação da comparação de médias

Fonte: Os autores

Aos 28 dias, pôde-se verificar que as argamassas com arenito peneirado sem lavagem apresentaram maiores valores do que aquelas com arenito lavado. A justificativa pode ser relacionada à presença de finos ao redor dos grãos no arenito apenas peneirado, que podem ter sido liberados na mistura e auxiliado na densificação da matriz, presença que pode ser benéfica em determinados teores[11]. Porém, caso estas partículas finas permaneçam no entorno do agregado, podem prejudicar a aderência deste com a pasta[12], além de que a presença de elevadas porcentagens de grãos menores que 0,075mm na mistura pode reduzir a aderência de argamassas com o substrato[13].

Para a resistência à compressão (Figura 4), o teste estatístico resultou no mesmo comportamento da resistência à tração na flexão, porém também foi observado o efeito significativo da cor do agregado. As argamassas com ambos os arenitos amarelos e com

o arenito vermelho lavado apresentaram resistências consideradas estatisticamente iguais entre si aos 28 dias, e menores que à da areia natural. A argamassa com arenito vermelho peneirado e sem lavagem apresentou resultado estatisticamente igual à de referência, mesmo que tenha demandado um maior teor de água, e resultado superior à do arenito vermelho lavado, indicando que o tratamento do agregado exerceu influência na resistência à compressão. Além disso, pôde-se verificar que as argamassas com arenito peneirado sem lavagem apresentaram resistência à compressão diferentes conforme a coloração do agregado, sendo superiores com o arenito vermelho.

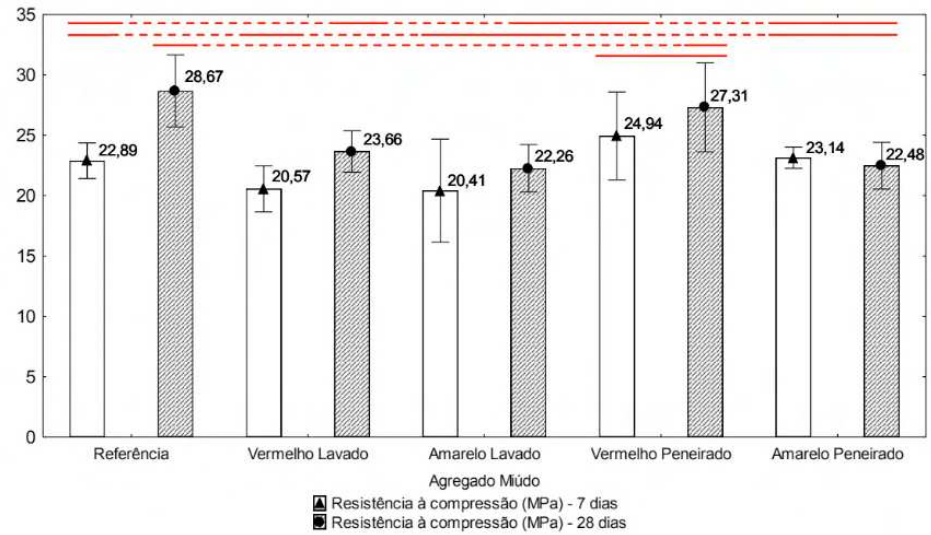


Figura 4 –Resistência à compressão das argamassas e indicação da comparação de médias

Fonte: Os autores

4 | CONCLUSÕES

Tendo em vista o que foi apresentado, na maioria dos ensaios realizados o resíduo de arenito apresentou resultados similares aos da areia natural silicosa originária de rio, quando utilizado como agregado miúdo para a produção de argamassa. Em geral, todas as argamassas avaliadas apresentaram baixa resistência à tração na flexão e elevada resistência à compressão, além de um comportamento e ordem de grandeza semelhante para a absorção de água por capilaridade.

Os tipos de arenito (vermelho e amarelo) apresentaram características químicas semelhantes, porém, foi possível verificar diferença entre eles no caso da resistência à compressão. Verificou-se também que as amostras com arenito apenas peneirado, que continha os finos no entorno dos grãos, em geral, obtiveram maiores resistências mecânicas.

A argamassa com o arenito vermelho peneirado e sem lavagem exibiu propriedades similares à de referência nos parâmetros avaliados, apresentando-se estatisticamente

iguais quanto à resistência à compressão. O resultado indica o potencial de uso deste resíduo como agregado miúdo em matrizes cimentícias.

Esta pesquisa se restringiu a analisar argamassas de cimento para verificar a viabilidade inicial do resíduo, sendo necessário, para atingir propriedades e utilizações distintas, uma avaliação específica para cada caso. Por este motivo, sugere-se a continuidade de estudos com o arenito em argamassas e concretos quanto à dosagem, à aplicabilidade e à durabilidade.

REFERÊNCIAS

1. FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil.** São Paulo: ABGE, 2002.

2. BARBOSA, N. S. F.; FERREIRA, X. C. Regularização Ambiental de Atividade de Mineração: a Experiência de Taquara. In: BENJAMIN, A. H. (Org.). **Direitos Humanos e Meio Ambiente**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2006. p. 233-239. v. 1. Disponível em: <http:// www.planetaverde.org/arquivos/biblioteca/ arquivo_20140211190403_8818.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2014.

3. GIORDANI, C. **Viabilidade técnica do uso de resíduo do beneficiamento de arenito como substituição do agregado miúdo em argamassas**. 2014. 124 f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de tetos e paredes – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de tetos e paredes – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de tetos e paredes – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

8. WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. **Materials and Structures**, n. 44, p. 1139–1150, nov. 2010. https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2.

9. CHARUSIRI, P. *et al*. **Petrographic, SEM and XRD Investigations of Sandstones.** Project submitted to PTT Exploration and Production. Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, jan. 2012. Disponível em: <http://www.eatgru.sc.chula.ac.th/ Thai/research/pdf/report/report_punya/res_051.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

11. PEREIRA, T. A. da C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de Cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

12. FARIAS, M. M. de; PALMEIRA, E. M. Agregados para construção civil. In: Isaia, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007, p.437-479, v. 1.



O RESÍDUO DE NIÓBIO E SUAS POTENCIAIS APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO DA LITERATURA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081161

ALVES; JORDANE G.S.[1]; MAZZARO; FILIPE S.[1]; ALMEIDA; FERNANDO C.R.[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: FERNANDO@DEMC.UFMG.BR

RESUMO: A construção civil é responsável por uma alta emissão de gases estufa e extração de grandes volumes de recursos naturais. Uma alternativa para mitigar esse problema é a substituição de componentes de concretos e argamassas pelos rejeitos da mineração. O presente artigo objetiva apresentar uma revisão da literatura sobre rejeitos gerados no processamento do nióbio e a viabilidade técnica de seu uso na construção civil. A substituição de materiais convencionais por esse resíduo contribui para a melhoria das propriedades dos compósitos cimentícios e diminui os impactos causados pela construção civil.

PALAVRAS-CHAVES: Concreto, rejeito, nióbio.

ABSTRACT: Civil construction is responsible for high greenhouse gas emissions and extraction of large volumes of natural resources. One of the alternatives to mitigate this problem is the incorporation of mining wastes in concrete and mortars. This article aims to present a review of the literature on tailings generated in the processing of niobium and the technical feasibility of its use in civil construction. The replacement of conventional materials by this residue contributes to the improvement of the properties of cementitious composites and reduces the impacts caused by civil construction.

KEYWORDS: Concrete, tailings, niobium.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria da construção civil é responsável por cerca de 5% de todo o CO_2 produzido no mundo. Além disso, é responsável pelo consumo de 40 a 75% de toda matéria-prima produzida no planeta[(1)(2)].

De acordo com as diretrizes expostas na Agenda 21, documento assinado pelos 179 países participantes da Rio 92 na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Terra é uma fonte finita, cujos recursos naturais podem variar com o tempo e de acordo com os usos a eles atribuídos[(3)]. Reduzir a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso dos recursos energéticos e naturais, até o ano de 2030, é também um dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável, propostos pela ONU, por meio da Agenda 2030[(4)]. A crescente pressão sobre os recursos terrestres cria competição e conflitos, tendo como resultado um uso impróprio tanto da terra como dos recursos naturais. Assim, é essencial avançar para um uso mais eficaz e eficiente dos materiais e elementos disponíveis, caso se queira

atender às necessidades humanas de maneira sustentável.

Um exemplo de processo gerador de passivos ambientais presente na indústria da construção civil é a extração de areia, um dos principais componentes de concretos e argamassas. Tal atividade provoca sérios problemas ambientais, como, por exemplo, assoreamento de leitos de rios, alterações nas características físicas do terreno e subtração de parte da cobertura vegetal existente[1].

Neste contexto, pesquisas como as de Tomar *et al.*[5], González *et al.*[6], Kirthika *et al.*[7] e de Carvalho *et al.*[8] apontam para o possível uso de rejeitos da mineração como substitutos parciais ou integrais da areia na composição de argamassas e concretos. Essa substituição poderia significar o aproveitamento de um material potencialmente poluidor, como são os rejeitos, simultaneamente à diminuição da extração de recursos naturais, como a areia.

Assim, busca-se não somente um ganho ambiental, mas também uma melhoria nas propriedades de compósitos cimentícios produzidos com materiais alternativos, em relação àqueles produzidos com materiais convencionais, especialmente no tocante à trabalhabilidade, consistência, porosidade, coesão e resistência[7][8][9].

O presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre os rejeitos gerados no processamento do nióbio e a influência nas propriedades físicas e mecânicas de concretos contendo rejeitos de mineração similares.

2 | O PROCESSAMENTO DO NIÓBIO E SEUS RESÍDUOS

O Brasil detém as maiores reservas mundiais de nióbio e é responsável por 98% da produção (reserva, extração e processamento) desse minério, seguido por Canadá e Austrália, que respondem pelo percentual restante[10]. No país, as reservas de nióbio (Nb_2O_5) estão concentradas nos estados de Minas Gerais (75,08%), Amazonas (21,34%) e Goiás (3,58%). Atualmente, no município de Araxá, estado de Minas Gerais, se localiza a maior reserva mundial de nióbio em processo de exploração, a qual é operada pela CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração)[10] .

De modo geral, o processo de beneficiamento do minério é constituído pelas etapas de britagem, moagem, separação magnética, deslamagem e flotação (Figura 1). Os principais rejeitos gerados são provenientes das últimas três etapas[11].

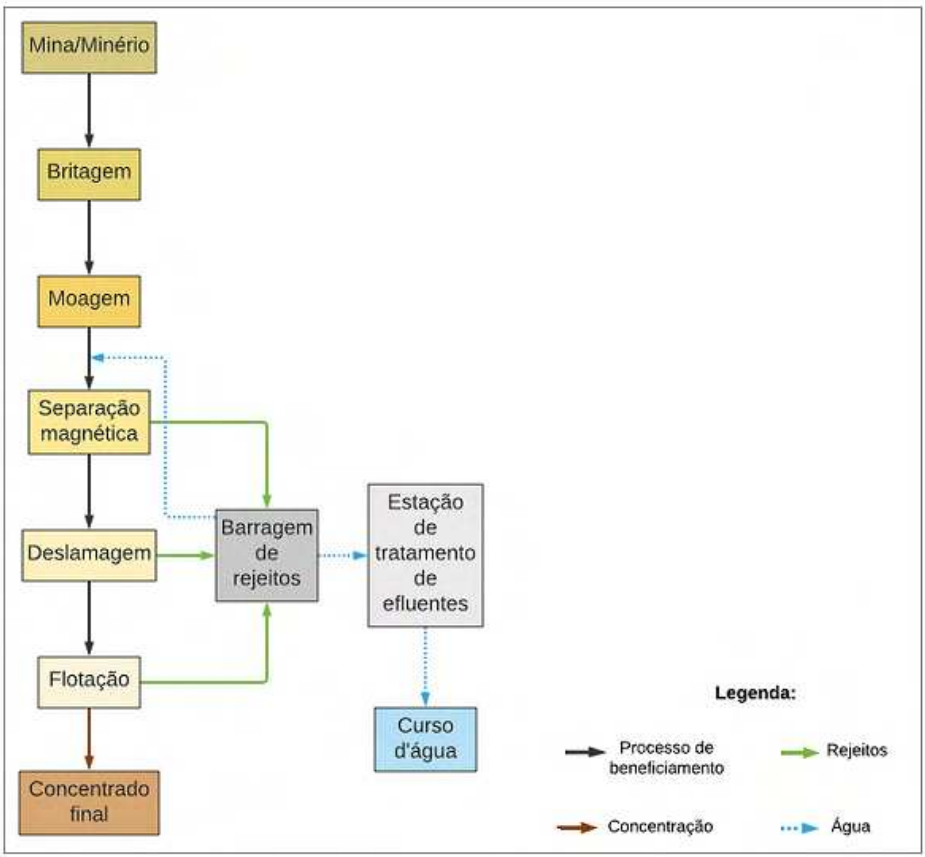


Figura 1 - Etapas do beneficiamento do nióbio

Fonte: Adaptado de Lemos Júnior [11]; Alves; Coutinho [12]

O primeiro rejeito gerado no processo é constituído basicamente de magnetita, removida do minério por meio de separadores magnéticos. Na deslamagem, materiais com granulometria ultrafina são removidos por ciclones. Ao final do processo de concentração, o minério passa pelas células de flotação, com nova fase de geração de rejeitos e concentração de óxido de nióbio (Nb_2O_5) para cerca de 60%[11][12].

Após cada etapa de beneficiamento, os rejeitos são encaminhados para a barragem de contenção, seja por bombeamento ou por gravidade, como ocorre com a lama e os rejeitos da flotação[11][12]. De acordo com Alves[13], uma unidade industrial com capacidade de produzir 100 mil toneladas de nióbio por ano, gera 4 milhões de toneladas de resíduos sólidos, incluindo diferentes tipos de rejeitos do ponto de vista granulo-químico.

Segundo Lemos Júnior[11], análises de granulometria indicaram a presença de partículas mais finas para a mistura de lama e flotação, com frações mais grossas para o

rejeito de magnetita e uma distribuição granulométrica intermediária para a mistura de lama, flotação e magnetita. Os três tipos de rejeitos apresentaram uma fração dominante de areia fina, nas proporções de 55,2% para o rejeito de lama e flotação, 57,3% para o rejeito de lama, flotação e magnetita e de 44,4% para o rejeito de magnetita. As demais frações se dividem predominantemente entre areia média e silte[11]. De acordo com Lopes[14], o rejeito resultante da etapa de separação magnética se encontra em granulometrias distintas, mas com alto índice de partículas finas.

A Tabela 1 sintetiza os resultados aproximados dos principais elementos encontrados em análises químicas, realizadas por diversos autores que estudaram o rejeito oriundo do processamento do nióbio.

	Lemos Júnior [11]		Alves; Coutinho[12]		Issa Filho *et al.* [15]
Elemento	Rejeito de lama e flotação	Rejeito de magnetita	Rejeito de lama e flotação	Separação magnética	Minério residual
	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%) (*)
Fe	59,5	87,8	59,5	87,8	45,0
Ba	18,5	3,1	18,5	3,1	16,0
Ti	8,3	3,6	8,3	3,6	4,0
S	7,5	2,6	2,1	2,6	7,0
P	2,1	1,0	2,1	1,0	3,7

* Nota: Fe_2O_3; BaO; TiO_2; SO_3; P_2O_5, para Fe, Ba, Ti, S, P, respectivamente.

Tabela 1 - Resultados da caracterização química dos rejeitos do processamento do nióbio

Fonte: Adaptado de Lemos Júnior [11]; Alves; Coutinho [12]; Issa Filho *et al*. [15]

Em geral, foram encontradas baixas concentrações de nióbio nos rejeitos estudados (abaixo de 0,8%), indicando um efetivo processo de beneficiamento do minério. Em contrapartida, foi possível verificar elevados teores de compostos à base de ferro e bário, para todas as amostras analisadas, com exceção do rejeito de magnetita, que apresentou somente ferro em maior concentração. Em consequência, tais rejeitos apresentaram densidades de partículas sólidas relativamente altas, variando de 4,3 a 4,9 g/cm^3[11] (a massa específica de areias convencionais para argamassas pode variar de 2,6 a 2,9 g/cm^3)[16].

Desta forma, uma potencial incorporação desses rejeitos à base de barita ($BaSO_4$) e magnetita (Fe_3O_4) em matrizes cimentícias pode sugerir uma tendência de produção de concretos e argamassas com elevadas massas específicas[17][18][19][20].

3 | POTENCIAIS APLICAÇÕES DOS RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Na literatura, verifica-se uma escassez de trabalhos sobre o uso de rejeitos do processamento do nióbio em matrizes cimentícias. Lopes[14], ao estudar a incorporação

de estéril escalpado da mineração do nióbio em adição e substituição ao agregado graúdo convencional, obteve como resultado amostras de desempenho mecânico superior a de concretos de referência. No entanto, verifica-se uma lacuna no conhecimento a respeito da possibilidade de aplicação deste resíduo como agregado miúdo. Sendo assim, apresentam-se alguns trabalhos a respeito da viabilidade da aplicação de resíduos de mineração, sobretudo aqueles à base de ferro e bário, indicando potenciais usos para os rejeitos do processamento de nióbio em argamassas e concretos.

Em estudo realizado por Mendes *et al.*[21], foi analisada a viabilidade técnica da substituição de agregados naturais por materiais alternativos, simultaneamente ao reaproveitamento do rejeito magnético gerado no processamento de rochas fosfáticas. Foram estudados os efeitos da substituição da areia por magnetita na composição do concreto, produzindo-se amostras com 0% (referência), 5% e 10% de rejeito magnético. Foi apontado um aumento gradual no valor da resistência à compressão, com o aumento do tempo de cura das amostras e à medida em que houve um acréscimo na proporção, em massa, de areia substituída por magnetita.

Castillo[22], em estudo a respeito do uso da barita em pó, como substituta da areia na composição do concreto, indicou um aumento do peso unitário da mistura com o aumento da porcentagem de barita adicionada, assim como um aumento na trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Segundo a autora, entre os objetivos do estudo estiveram a proposição de um material alternativo ao chumbo e aos minerais de ferro na produção de concretos de alta densidade, empregados na blindagem contra radiações. A autora aponta ainda que os concretos produzidos com proporções de barita acima de 70% (em volume) em substituição ao agregado convencional, atingiram densidades características de concretos pesados[1] .

Franco *et al.*[25] analisaram a viabilidade do emprego do rejeito de barragem de minério de ferro em estado bruto, incluindo a fração ferrosa, na produção de concretos. Foram realizadas dosagens para as classes de concreto C20, C30 e C40 com utilização do rejeito, ora como adição às misturas de concreto, ora como substituto do agregado miúdo nas proporções, em massa, de 0,5%, 5%, 10% e 50%. Para fins de comparação, também foram produzidas dosagens com agregados naturais. Para todas as classes de concreto, com a adição do rejeito, houve uma melhora da resistência mecânica à compressão e à tração devida, segundo os autores, provavelmente ao efeito *filler* induzido pela maior presença de finos em adição. Concluiu-se que a adição do rejeito se mostrou mais favorável do que a substituição do agregado miúdo natural por este resíduo. Os resultados alcançados permitiram atestar a viabilidade do uso do rejeito de barragem de minério de ferro como matéria-prima de concretos, conferindo-lhes um melhor desempenho mecânico, pelo uso do rejeito como *filler.*

A viabilidade do emprego do rejeito de *sinter feed* - resíduo pesado gerado no processo de produção do minério de ferro - como substituto da areia natural na produção de elementos pré-fabricados de concreto, foi objeto de estudo de Costa *et al.*[26]. A densidade obtida para a argamassa de referência, produzida com areia convencional, foi de 2,11 g/cm^3, enquanto para a argamassa contendo o rejeito, obteve-se uma densidade de 2,78 g/cm^3. De acordo com os autores, a argamassa produzida com adição do rejeito de *sinter feed* apresentou maior resistência à compressão axial que a argamassa de referência, evidenciando um bom desempenho com relação às

1 Apesar da NBR 8953 (ABNT, 2015)[23] definir concretos pesados como aqueles com densidade superior a 2.800 kg/m^3, a norma europeia EN 206 (CEN/TC, 2016)[24] adota o valor de 2.600 kg/m^3.

propriedades mecânicas. Como agregado na produção de concreto para elementos de quaisquer obras assentes diretamente sobre o terreno, o rejeito de *sinter feed* contribuiria para uma maior estabilidade da pavimentação, à medida que constituiria pavimentos com maior peso próprio, menos sujeitos a deformações.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Seguindo as proposições para um desenvolvimento sustentável, o setor da construção civil deve assumir cada vez mais um papel de destaque na busca por soluções alternativas, visando a diminuição de processos geradores de degradação ambiental. O desenvolvimento de novos materiais, produzidos por meio do reaproveitamento de resíduos, se apresenta como uma das alternativas para o gerenciamento dos impactos ambientais causados pela exploração de recursos naturais. O emprego de rejeitos de mineração na produção de compósitos cimentícios se traduz em menores impactos ambientais causados pela extração de areia natural e pela necessidade da construção de barragens. Essa proposta se insere no escopo dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, da Agenda 2030 da ONU, ao promover, além da reciclagem dos resíduos, a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.

Especificamente sobre os rejeitos de mineração do nióbio, devido a escassez de trabalhos sobre o tema, este artigo se mostra relevante para o balizamento de estudos sobre a incorporação desses resíduos em matrizes cimentícias. Investigações correlatas, a respeito de concretos e argamassas contendo resíduos à base de magnetita e barita (principais constituintes do rejeito do processamento do nióbio), demonstram a viabilidade técnica dessa aplicação. A obtenção de concretos de alta densidade, com trabalhabilidade e resistência mecânica superiores a amostras contendo agregados convencionais, indicam a possibilidade de desenvolvimento de novos materiais, orientando novos rumos de pesquisas e de inovações tecnológicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DEMC/UFMG e ao PIBITI/CNPq/UFMG pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. GASQUES, A. C. F. *et al*. Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica. **Revista Tecnológica**, v. 23, p. 13–24, 2014.

2. HABERT, G. *et al*. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p.559–573, 2020.

3. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - Agenda 21. Rio de Janeiro, 1992.

4. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**, 2015.

5. TOMAR, A. K. *et al*. Review on Utilization of Waste Marble Powder in Self-Compacting Concrete. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 37, n. 2, 2016.

6. GONZÁLEZ, J. S. *et al*. Use of Mining Waste to Produce Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete. **Materials**, v. 13, n. 11, p. 1–13, 2020.

7. KIRTHIKA, S. K. *et al*. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. **Journal of Cleaner Production**, 268, 122089, 2020.

8. CARVALHO, J. *et al*. Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, 2020.

9. SCRIVENER,K.L. *et al*. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, 114, 2–26, 2018.

10. PEREIRA JÚNIOR, R.F. Nióbio. **ANM**, 2008.

11. LEMOS JUNIOR, M.A. **Estudos para avaliação da capacidade de reservatórios de rejeitos de nióbio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). UFOP, Ouro Preto, 2012.

12. ALVES, A. R.; COUTINHO, A. R. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. **Minerals Engineering**, v. 132, n. June 2018, p. 275–283, 2019.

13. ALVES, R.A. **Proposição de um modelo para a avaliação do ciclo de vida do nióbio.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2015.

14. LOPES, D. F. **Análise técnica da substituição parcial e total do agregado graúdo por estéril escalpado de mineração destinado a fabricação de concreto**. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional). UFG, Catalão, 2018.

15. ISSA FILHO, A. *et al*. Some aspects of the mineralogy of CBMM niobium deposit and mining and pyrochlore ore processing – Araxá, MG – Brazil. **Niobium, Science and Technology**, p. 53–65, 2001.

16. CARASEK, H. *et al*. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, n.3, p.714-732, 2016.

17. HORSZCZARUK, E.; BRZOZOWSKI, P. Investigation of gamma ray shielding efficiency and physicomechanical performances of heavyweight concrete subjected to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 574–582, 2019.

18. DRAGOMIROVÁ, J. *et al*. Optimization of cementitious composite for heavyweight concrete preparation using conduction calorimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 142, n. 1, p. 255–266, 2020.

19. SIKORA, P. *et al*. Incorporation of magnetite powder as a cement additive for improving thermal resistance and gamma-ray shielding properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 113–121, 2019.

20. AHMAD, I. *et al*. Densification of concrete using barite as fine aggregate and its effect on concrete mechanical and radiation shielding properties. **Journal of Engineering Research (Kuwait)**, v. 7, n. 4, p. 81–95, 2019.

21. MENDES, M.V.A. *et al*. Substituição do agregado miúdo por magnetita na composição do concreto. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.10, p.513, 2014.

22. CASTILLO, K.S.M. **Comparación entre el concreto convencional y el concreto con barita en polvo como sustituyente del agregado fino**. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Civil), Universidad Señor de Sipán, Pimentel, 2016.

23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, p.3, 2015.

24. EN 206:2013+A1:2016. Concrete - Specification, performance, production and conformity. **CEN/TC**, p. 102, 2016.

25. FRANCO, L. C. *et al*. **Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto**. 56º Congresso Brasileiro do Concreto CBC, n. 1, p. 1–15, 2014.

26. COSTA, A. V. *et al.* Estudo de caracterização e viabilidade do emprego do rejeito de *sinter feed* como alternativa de substituição das areias naturais como agregado na produção do concreto. **Construindo - FUMEC**, v. 4, n. 2, p. 42–52, 2012.



PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS PRODUZIDOS PARA NÚCLEO DE PAINEL SANDUÍCHE

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081150

PEREIRA; ALEXANDRE ROSIM[1]; ROSSIGNOLO; JOÃO ADRIANO[1]
[1]UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSSISTEMAS- PIRASSUNUNGA – SÃO PAULO
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ALROPE1973@GMAIL.COM

RESUMO: O objetivo deste estudo foi avaliar painéis de partículas de subprodutos da agroindústria, para compor núcleos de painéis sanduíche. O uso de painéis na construção civil se refere ao atendimento de requisitos normativos de desempenho. Para uma correta especificação dos painéis deve-se avaliar a durabilidade em relação à água. A discussão proposta neste estudo se deu pela revisão bibliográfica de trabalhos que versam sobre o tema. Este trabalho se dedicou ao estudo das propriedades físicas inchamento da espessura em 24 horas (I) e teor de umidade (UM). Os resultados indicaram o uso comercial geral interno não estrutural em condições secas.

PALAVRAS-CHAVES: Sistema construtivo; componentes; duráveis; sustentáveis; lignocelulósicos.

ABSTRACT: The objective of the study was to develop particleboards made of agroindustry by-products, to compose the sandwich panel cores. The use of panels in civil construction refers to the accomplishment of performance normative requirements. For a correct specification of the panels, the durability in relation to water should be evaluated. The proposed discussion of the study was based on the review of papers over the subject. This paper goal was study of the physical properties thickness swelling in 24 hours (I) and moisture content (UM). The results indicated the general non-structural internal commercial use in dry conditions.

KEYWORDS: Construction system; components; durable; sustainable; lignocellulosics.

1 | INTRODUÇÃO

Alguns dos requisitos para o uso de painéis na construção civil se refere as propriedades resistentes à umidade. Produtos derivados da madeira expostos à fatores degradantes sem tratamento adequado, podem sofrer negativamente alterações em suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Dessa forma os testes de caracterização de desempenho destes componentes podem conduzir diretrizes de uso adequados de um produto mais durável, consequentemente sustentável e competitivo[(1)].

Segundo a ABNT 15.575-1[(2)] durabilidade é a capacidade de desempenho da edificação ou de seus sistemas, seu comportamento durante ao longo do tempo sob condições de manutenção especificadas por norma. A durabilidade é utilizada como termo qualitativo, para representar o estado em que se encontra a edificação ou seus

sistemas durante sua vida útil[2].

Por ser uma propriedade física caracterizada pela capacidade da madeira absorver a umidade do ar ou do meio ambiente adjacente, a higroscopicidade pode causar variação dimensional nos painéis[3].

Segundo a NBR 14810-2:2013[4], inchamento da espessura é o aumento percentual da espessura que um corpo de prova de um painel apresenta após o ensaio de imersão. Teor de umidade é a porcentagem de água liberada por um corpo de prova de um painel após o ensaio de secagem[4].

A utilização de produtos derivados de madeira tem crescido como uma alternativa para substituir o uso da madeira serrada na construção civil. Entre estes produtos estão os painéis de partículas de média densidade (MDP), o OSB (Oriented Strand Board) e os painéis de fibras de média densidade (MDF)[3].

Estudos demonstram que estes painéis podem ser produzidos com madeiras de reflorestamento, com os resíduos da indústria madeireira e ainda com a associação da madeira a outras fibras naturais como os resíduos da agroindústria. Denominados painéis híbridos, podem ser uma forma de superar algumas limitações em termos de propriedades físicas, mecânicas e térmicas, além de serem uma alternativa sustentável[5].

A norma ANSI A208.1[6] apresenta os requisitos e possíveis aplicações para os painéis de partículas que incluem o uso comercial e industrial geral externo e interno não estrutural em condições secas[6].

Os painéis de partículas podem ser utilizados como componentes de alguns sistemas construtivos da construção civil, um exemplo é a utilização para compor o núcleo de painéis sanduiche. Um tipo de painel sanduiche com núcleo de painel de partículas de madeira balsa foi utilizado como base de rolagem em um sistema alternativo para a construção de uma ponte[7].

Assim a proposta do trabalho é um estudo descritivo, utilizando como método a pesquisa de artigos publicados sobre as propriedades inchamento da espessura em 24 horas (I) e teor de umidade (UM), com o objetivo de comparar resultados com os valores encontrados no estudo experimental de painéis de subprodutos da agroindústria desenvolvidos com partículas de madeira pinus e fibras da casca de coco verde.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

O Brasil está em uma posição proeminente no setor mundial de produção de painéis de madeira por causa da variedade de produtos que fabrica. Segundo a IBÁ[8], o Brasil ocupava a oitava posição do ranking mundial. Normalmente, a matéria prima dos painéis é proveniente de florestas plantadas, especialmente as espécies de pinus e eucalipto. Porém com o grande crescimento do mercado de painéis, surge o interesse por outros materiais mais sustentáveis como os subprodutos da agroindústria[9].

2.1 Painéis de partículas de subprodutos da agroindústria: pesquisa de estudos recentes

A revisão proposta buscou artigos científicos que objetivaram a análise de painéis de partículas produzidos por qualquer tipo de material lignocelulósico, aplicado

como componente em *núcleo de painéis sanduíche* com potencial de uso na construção civil. A estrutura mais simples de um painel sanduíche é formada por duas faces e um núcleo[10]. Como estratégia de busca utilizou-se em duas bases de dados as seguintes palavras-chave combinadas e inseridas consecutivamente como seguem: *sandwich* and particleboard* and core**.

As buscas ocorreram a partir do ano de 1960 (somente selecionados trabalhos com revisão paritária), os termos deveriam estar no título, no resumo e nas palavras-chave dos artigos. A procura resultou um total de 64 artigos (38 na *Web of Science* e 36 na Scopus), até o ano de 1999 apenas 3 artigos foram publicados, no período entre os anos de 2000 até 2021 notou-se um aumento no número de publicações, porém representam apenas aproximadamente uma e meia publicação por ano. Foi realizada a leitura dos resumos de cada artigo para verificar a conformidade com o tema em questão.

Apenas nove dos artigos pesquisados estudaram painéis tipo sanduíche com faces e/ou núcleos compostos *exclusivamente* de painéis de partículas e fibras de subprodutos da agroindústria. Dez publicações avaliaram o potencial de aplicação dos painéis sanduíche produzidos com painéis de partículas em sistemas de vedação não estrutural.

Constatou-se na revisão que os artigos avaliaram principalmente as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas de painéis tipo sanduíche. No entanto, a utilização dos subprodutos da agroindústria em painéis de partículas como núcleo dos painéis sanduíche e sua aplicação como componente ou elemento construtivo se apresenta incipiente.

O item 2.2, apresenta estudos recentes que trataram do desenvolvimento e avaliação de painéis produzidos com materiais alternativos em substituição à madeira. Os resultados demonstram a pontecialidade de aplicação dos subprodutos na produção dos painéis.

2.2 Estudos recentes sobre as propriedades inchamento da espessura em 24 horas(I) e teor de umidade (UM)

A seguir apresentam-se alguns trabalhos que incluiram tratamentos químicos e térmicos com o objetivo de diminuir a higroscopicidade dos painéis avaliando as propriedades inchamento da espessura (I) e teor de umidade (UM). Os resultados dos estudos e requisitos normativo estão resumidos na Tabela 1.

No estudo de Veloso[9], a medida que se insere o resíduo de Japuti na produção dos painéis de partículas (em substituição ao eucalipto nas proporções 10%, 20% e 30% em relação a massa total) aumenta-se a higroscopicidade, porém conclui-se que utilizando uma porcentagem do resíduo próximo de 10% em substituição ao eucalipto e mesmo com a absorção de água em aproximadamente 65%, o painel atende ao requisito (I) com resultado próximo aos 18%. Ribeiro[11], avaliou o efeito dos diferentes níveis de temperatura no tratamento térmico das fibras da cana-de-açúcar em substituição a madeira para a produção de painéis de partículas. As temperaturas utilizadas foram 170°C, 200°C e 230°C. O estudo demonstrou diminuição da higroscopicidade em 22,67%, redução associada a uma menor acessibilidade da água pela degradação da hemicelulose das fibras. Os resultados para (I) e (UM) atenderam aos requisitos

normativos.

Lee[12], produziu painéis de partículas do tronco da árvore Óleo de Palma associada a madeira da Seringueira na proporção 100%:0%, 70%:30%, 50%:50%, 30%:70% e 0%:100%. Combinou as propriedades repelente do óleo de palma com a aplicação do tratamento térmico para avaliar a redução da higroscopicidade. O estudo apresentou redução significativa da higroscopicidade comparada as amostras sem tratamentos.

Poleto[3], avaliou um protótipo em escala laboratorial produzido com painéis de partículas de média densidade (MDP) de resíduos de Pinus, *Pinus sp*., tratados com CCB (Cromo Cobre Boro) e painéis com resina poliuretana à base de óleo de mamona (PU) e Osmocolor (OC). As propriedades físico-mecânicas foram avaliadas antes e depois dos testes de envelhecimento natural. Os maiores resultados para a absorção de água depois do envelhecimento natural foram 17,29% para (PU) e 18,20% para (OC). Os resultados indicaram a possibilidade de uso dos painéis em sistemas de vedação.

Mirski[13], estudou o aproveitamento dos subprodutos da indústria madeireira. Os painéis produzidos utilizaram partículas de Pinus e pó da madeira sem nenhum processamento nas proporções 70%:30% e 60%:40%. Os resultados indicaram que os painéis podem ser utilizados em sistemas construtivos internos não-estrutural e como núcleos de portas, tampos de balcões e peitoris. Iswanto[14], desenvolveu e testou as propriedades físico-mecânicas e acústica de painéis produzidos com partículas de bambu em três camadas com fibras da palmeira-do-açúcar, do bagaço de cana e partículas de espiga de milho. Os resultados de algumas composições atenderam aos requisitos normativos para as propriedades físicas (I) e (UM).

Barbu[15], avaliou o potencial de painéis de partículas produzidos com os resíduos da indústria cervejeira em substituição à madeira nas proporções 10%:90%, 30%:70% e 50%:50%. Os resultados dos painéis produzidos com 10% de resíduos atenderam aos requisitos de uso em condições secas internas não estruturais.

Diante dos exemplos apresentados, o desenvolvimento de novos trabalhos pode impulsionar as pesquisas sobre o tema e ainda propor componentes construtivos mais sustentáveis e inovadores. A revisão demonstrou o potencial das fibras vegetais pelo bom comportamento das composições dos subprodutos da agroindústria em atendimento aos requisitos normativos. Em alguns estudos, a utilização da fibra da casca de coco verde e os tratamentos térmico e químico se mostraram eficientes para a redução da higroscopicidade.

Dessa forma o estudo dos painéis experimentais deste trabalho se justifica para o bom desempenho, durabilidade e atendimento aos requisitos normativos de componentes construtivos industrializados mais sustentáveis.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os painéis de fibras e partículas homogêneas (Figura 1c) de um dos estudos apresentados (estudo experimental), foram produzidos com dois subprodutos da agroindústria, a fibra da casca de coco verde (Figura 1a), *Cocos nucifera*, e partículas de madeira pinus (Figura 1b), *Pinus* sp.,[16] conforme (Figura 1).

O adesivo usado para a produção dos painéis de subprodutos agroindustriais foi uma resina orgânica bicomponente poliuretana à base de óleo de mamona[16].

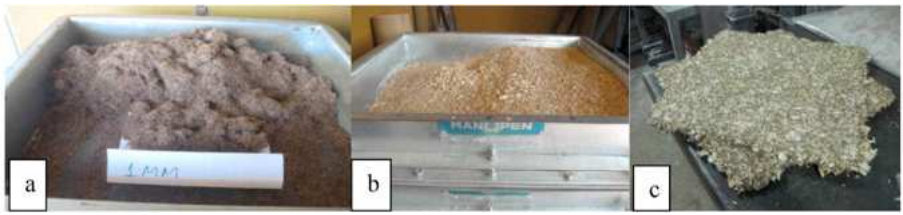


Figura 1 - Conjunto de peneiras e classificação das matérias primas

(a) Fibras retidas na peneira de 1mm. (b) Partículas retidas na peneira de 2mm. (c) Painel de partículas e fibras de subprodutos agroindustriais.

Fonte: Próprio autor

A matéria prima foi seca a uma temperatura de 60°C por 36 horas, reduzindo sua umidade abaixo de 13%. A redução da umidade impregnada evita a expansão dos painéis durante o processo de produção[16]. As partículas com dimensões entre 2,0 mm e 8,0 mm e as fibras com dimensões entre 1,0 e 4,0 mm, foram pesadas na proporção em massa de 70% e 30% respectivamente e misturadas com a resina PU-mamona em uma proporção de 15% sobre a massa total seca[16]. Para determinar a quantidade de matéria-prima a ser utilizada, consideraram-se as dimensões dos painéis, medidas laterais da forma pela espessura do painel. Com os volumes dos painéis e as densidades de cada tratamento previamente estabelecidas em 350 kg/m³, 600 kg/m³ e 850 kg/m³, dimensionaram-se as quantidades de massa seca (fibra da casca de coco verde e partícula de madeira) de cada painel[16].

Após o tempo de mistura de 10 minutos, o material foi transferido para uma prensa termohidráulica a uma temperatura de 100ºC, pressão de 5 MPa e tempo de aplicação de carga de 10 minutos. Produziram-se painéis com espessura média de 15 mm e dimensões aproximada de 400 mm x 400 mm[16].

Os painéis produzidos com os subprodutos da agroindústria para compor núcleo de painel sanduíche foram nomeados tratamentos T1-BD baixa densidade, T2-MD média densidade e T3-AD alta densidade. Suas propriedades foram comparadas com os resultados obtidos das amostras do painel comercial nomeado tratamento T4-MDP de média densidade[16]. A preparação das amostras e os testes físicos seguiram os critérios e requisitos da norma ABNT NBR 14810[4].

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os requisitos normativoo e os resultados dos trabalhos selecionados estão resumidos na Tabela 1. Os painéis estudados e produzidos com os subprodutos da agroindústria, tratamentos T1-BD, T2-MD, T3-AD resultaram em densidades médias entre 359 kg/m³, 571 kg/m³, 777 kg/m³ respectivamente e o tratamento T4-MDP em 640 kg/m³ (Tabela 1).

Para a propriedade (I) os tratamentos T1-BD, T2-MD, T3-AD e T4-MDP resultaram em 10,88%, 14,57%, 17,56% e 24,32% respectivamente. Os resultados mostram piora na higroscopicidade dos painéis de subprodutos da agroindústria em relação ao aumento

da densidade, porém com valores inferiores ao painel comercial e em atendimento ao requisito normativo de 18% (Tabela 1). Segundo Cravo[17], que avaliou painéis compostos por casca de amendoim e fibra da casca de coco verde, a variação da densidade pode causar alteração da proporção de vazios na estrutura dos painéis de partículas, porém expõe que a massa específica isoladamente não é um parâmetro adequado para prever a variação de (I).

Os valores do ensaio da propriedade (UM) para os tratamentos T1-BD, T2-MD, T3-AD e T4-MDP resultaram em 9,89%, 8,08%, 8,39% e 7,85% respectivamente. Os valores não apresentaram diferença estatística significativa e atenderam ao requisito normativo de 5% a 13% (Tabela 1).

No trabalho de Narciso[18], foi possível analisar os resultados pelas porcentagens de fibras da casca de coco verde em substituição à madeira nas proporções de 25%:75%, 50%:50%, 75%:25% e 100%:0%. Para a propriedade (I), acima de 50% de inserção de fibra o inchamento foi reduzido, mantendo este comportamento até 100% em massa. Todos os tratamentos atenderam ao requisito normativo. O estudo demonstrou a influência da inserção da fibra em substituição à madeira, a propriedade (UM) reduziu de 78% para 46% com a produção do painel em 100% de fibra da casca de coco verde (Tabela 1).

Tratamentos experimentais/Literatura	Densidade (kg/m³)	I (%)	UM (%)	Fontes pesquisadas
Painéis de partículas de madeira	551-750	18	5-13	(4)
T1-BD (madeira Pinus + fibra da casca de coco verde)	359	10,88	9,89	Estudo experimental
T2-MD (madeira Pinus + fibra da casca de coco verde)	571	14,57	8,08	Estudo experimental
T3-AD (madeira Pinus + fibra da casca de coco verde)	777	17,56	8,39	Estudo experimental
T4-MDP (madeira Pinus + fibra da casca de coco verde)	640	24,32	7,85	Estudo experimental
10% Japuti e 90% eucalipto	580	18,58	------	(9)
Cana-de-açúcar a 230°C	664-709	7,30	4,70	(11)
50% Arvore óleo de palma e 50% Seringueira a 220°C	440-620	13,35	4,26	(12)
Pinus sp. (MDP-PU e MDP-OC)	830-900	16,10-17,50	------	(3)
Pinus sp. (Partículas de madeira+ pó de madeira)	600	12,30-16,40	------	(13)
Tripla camada (Partículas bambu)	400-700	8,29-22,94	6,00-7,29	(14)
Resíduos Indústria Cervejeira	570-790	17-34	------	(15)
Madeira Pinus + fibra de coco verde	630-660	10,57-12,78	9-12	(18)

Tabela 1 – Comparação dos resultados de valores médios de (I) e (UM) entre os requisitos normativos, o estudo experimental desenvolvido e trabalhos recentes publicados

Segundo Narciso[18], a propriedade está diretamente relacionada a composição química do material. Seu trabalho encontrou resultados para lignina e hemicelulose na fibra da casca de coco verde em 32,89 % e 29,02% respectivamente, valores superiores ao *Pinus oocarpa* em 28,62% e 23,61% respectivamente. O aumento da lignina pode melhorar as conexões entre as fibras e consequentemente as propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Em relação a celulose o *Pinus oocarpa* resultou em 51,86% e a fibra em 39,71%, vale ressaltar que a holocelulose (celulose+hemicelulose) pode proporcionar melhorias nas propriedades mecânicas, porém pode aumentar a higroscopicidade dos painéis em função da porcentagem da hemicelulose (Tabela 1).

5 | CONCLUSÃO

Os resultados demonstram o bom desempenho dos painéis experimentais de subprodutos da agroindústria em comparação ao painel comercial T4-MDP e aos trabalhos pesquisados. Os tratamentos experimentais T1-BD, T2-MD e T3-AD atenderam aos requisitos da NBR 14810-2[4]. Os resultados para a propriedade Inchamento da Espessura em 24 horas foram inferiores ao valor do tratamento T4-MDP (painel comercial). Para a propriedade Teor de Umidade os resultados foram similares entre os tratamentos. Considerando os requisitos da norma ANSI A208.1[6] uma possível aplicação para estes painéis seria o núcleo de portas revestidas (designação LD-1) e o uso comercial geral interno não estrutural em condições secas (designação M-S e M-1). Os resultados demostraram o potencial de aplicação dos subprodutos da agroindústria na produção de painéis homogêneos de partículas e fibras e indicaram a possibilidade de compor núcleos de painéis sanduíche. Dessa forma as pesquisas podem valorizar e propor uma destinação mais adequada aos subprodutos da agroindústria.

REFERÊNCIAS

1. NASCIMENTO, M. F. do; CHRISTOFORO, A. L.; CAMPOS, C. I. de; ALMEIDA, D. H. de; LAHR, F. A. R. Efeitos das intempéries na rugosidade de painéis de partículas de *Pinus* sp. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 227-238, jul./set. 2018.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1** Edificações Habitacionais Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

3. POLETO, S. F. S.; AQUINO, V. B. DE M.; CHAHUD, E.; PINHEIRO, R. V.; BRANCO, L. A. M. N.; SILVA, D. A. L.; CAMPOS, C. I. DE; MOLINA, J. C.; CARVALHO, C. M. DE; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Evaluation of CCB-preserved medium density particleboards under natural weathering. **BioResources**, v.15, n.2, p. 3678-3687, mar. 2020.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14810-2** Painéis de partículas de média densidade Parte 2: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

5. FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H. de; SOUZA, A. M. de; ALMEIDA, D. H. de; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painel híbrido OSB/MDP de madeira *Pinus taeda* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 7-14, jul./set. 2019.

6. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - **ANSI A208.1**. Matformed wood particleboard: Specification. National Particleboard Association Gaithersburg, United States, 1993.

7. MANOLO, A. **Fibre reinforced polymer composites sandwich structure:** Recent developments and applications in civil infrastructure. 2013. Centre of Excellence in Engineered Fibre Composites, Faculty of Health, Engeneering and Sciences, |University of Southern Queensland, Australia, 2013.

8. INDUSTRIA BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual 2020 ano base 2019.** Brasília: Disponível em: https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf.

9. VELOSO, M. C. R. DE A.; LOPES, F. M.; FURTINI, A. C. C.; SILVA, M. G. DA; MENDES, L. M.; JÚNIOR, J. B. G. Low-density particleboard properties produced with jupati particles and eucalyptus wood. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.15, n.4, p. 1-8, mar. 2020

10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C274.** Standard Terminology of Structural Sandwich Constructions. Philadelfia, United States, 1999.

11. RIBEIRO, D. P.; VILELA, A. P.; SILVA, D. W.; NAPOLI, A.; MENDES, R. F. Effect of Heat Treatment on the Properties of Sugarcane Bagasse Medium Density Particleboard (MDP) Panels. **Waste and Biomass Valorization,** v.11, p. 6429–6441, 2020.

12. LEE, S. H.; ASHAARFI, Z.; ANG, A. F.; HALIP, J. A. Dimensional stability of heat oil-cured particleboard made with oil palm trunk and rubberwood. **European Journal of Wood and Wood Products,** v.75, p. 285–288, 2017.

13. MIRSKI, R.; DUKARSKA, D.; DERKOWSKI, A.; CZARNECKI, R.; DZIURKA, D. By-product of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards. **Journal of Building Engineering,** v.32, p. 1–7, abr. 2020.

14. ISWANTO, A. H.; HAKIM, A. R.; AZHAR, I.; WIRJOSENTONO, B.; PRABUNINGRUM, D. S. The Physical, Mechanical, and Sound Absorption Properties of Sandwich Particleboard (SPb). **Journal of Korean Wood Science Technology,** v.48, n.1, p. 32–40, 2020.

15. BARBU, M.C.; MONTECUCCOLI, Z.; FÖRG, J.; BARBECK, U.; KLÍMEK, P.; PETUTSCHNIGG, A.; TUDOR, E. M. Potential of Brewer's Spent Grain as a Potential Replacement ofWood in pMDI, UF or MUF Bonded Particleboard. **Polymers,** v.13, n.319, p. 1–12, jan. 2021.

16. ROSIM PEREIRA. A. **Painéis sanduíche com faces de placas de fibrocimento e núcleo de painéis de partículas de subprodutos agroindustriais**. 181 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, São Paulo, 2019.

17. CRAVO, J. C. M. **Compósito particulado de baixa densidade com casca de amendoim, fibra de coco verde e resina poliuretana à base de óleo de mamona para aplicação como forro de galpões avícolas**. 166 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2013.

18. NARCISO, C. R. P.; REIS, A. H. S.; MENDES, J. F.; NOGUEIRA, N. D.; MENDES, R. F. Potential for the Use of Coconut Husk in the Production of Medium Density Particleboard. **Waste and Biomass Valorization,** v.12, p. 1647–1658, 2021.



IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DA GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM CAMPO GRANDE – MS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081151

PUPIN; NAYARA SEVERO[1]; MAIA; JOHNNY HEBERT DE OLIVEIRA[1]; MILANI; ANA PAULA DA SILVA[1]
[1]FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL.
NAYARA.PUPIN@UFMS.BR

RESUMO: Esta pesquisa objetiva analisar os impactos provocados por ações estratégicas alocadas nos Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Plano de Coleta Seletiva no tocante à logística reversa do Resíduo da Construção Civil (RCC), e verificar possíveis soluções nas lacunas existentes para contribuir com o aperfeiçoamento da gestão dos resíduos na cidade de Campo Grande/MS. Para tal, dados fornecidos pela Prefeitura foram analisados, como volume de RCC gerado. Desde a implantação dos planos, avanços foram conquistados, porém ainda apresenta falhas na efetivação. Ao final, sugestões foram propostas para que órgãos possam gerir de forma mais eficiente o RCC.

PALAVRAS-CHAVES: Gerenciamento; RCC; logística reversa.

ABSTRACT: This research aims to analyze the impacts caused by strategic actions allocated in the Construction and Demolition Waste Management Plan and Selective Collection Plan regarding the reverse logistics of Construction and Demolition Waste (CDW), and to check possible solutions in the existing gaps to contribute with the improvement of waste management in the city of Campo Grande/MS. Therefore, data provided by the Municipality were analyzed, such as the volume of CDW generated. Since the implementation of the plans, advances have been made, but there are still flaws in their effectiveness. At the end, suggestions were proposed so that agencies can manage the CDW more efficiently.

KEYWORDS: Management; CWD; reverse logistic.

1 | INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil (RCCs) pode trazer benefícios ambientais e socioeconômicos para a construção e os stakeholders(1). A quantidade do RCC coletada pelos municípios brasileiros registrou aumento quantitativo no período analisado, passando de 33 milhões de toneladas, em 2010, para 44,5 milhões, em 2019. Com isso, a quantidade coletada per capita cresceu de 174,3 kg para 213,5 kg por habitante, por ano(2).

O foco desta pesquisa é a cidade de Campo Grande/MS, onde as diretrizes para o gerenciamento do RCC foram legisladas em 2010 pela Lei Municipal nº 4.864(3) e regulamentada em 2017 pelo Decreto Municipal nº 13.192(4), que dispôs sobre a gestão dos RCCs e instituiu o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PIGRCC). Este é voltado à facilitação da correta disposição, ao disciplinamento dos fluxos e dos agentes envolvidos e à destinação adequada dos resíduos. Ele também

determina as responsabilidades de quem gera o resíduo, comprometendo-o a destinar de forma adequada os materiais resultantes de construção, demolição, reformas e reparo[4].

Em 2017 a Prefeitura Municipal de Campo Grande (PMCG), em parceria com a iniciativa privada, realizou um estudo completo da geração de resíduos na cidade e elaborou o Plano de Coleta Seletiva de Campo Grande (PCSCG), que definiu todas as projeções futuras e planos com relação a destinação do resíduo, assim como toda uma série de normas de como se deve proceder para o recebimento e descarte do material e como será a organização do local[5]. O PCSCG é um instrumento que objetivou planejar o manejo dos resíduos sólidos secos (recicláveis, incluindo os RCCs) e úmidos (orgânicos), durante um horizonte de 20 anos, de forma a melhorar a eficiência, majorar a recuperação de materiais, potencializar a geração de emprego, renda e inclusão social, bem como promover o atendimento das premissas legais.

Para a gestão do RCC na cidade, tem-se a ação estratégica de pontos de entrega (receptoras) para pequenos volumes de RCC (< 1m³): os Ecopontos e Locais de Entrega Voluntária - LEV; e para a recepção de grandes volumes: as Áreas de Transbordo e Triagem (ATTs) de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (ex: resíduos vegetais como podas de árvores), as Áreas de Reciclagem e Aterro de Reservação de RCC (este ainda não foi implementado). Até o ano de 2016, todo o entulho recolhido pela prefeitura era disposto no Aterro de Entulhos Noroeste II, contudo o mesmo foi fechado pela justiça pois o resíduo não era triado, consequentemente não havia a correta disposição final.

O gerenciamento dos RCCs na cidade ainda é incipiente. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar um panorama atualizado dos resíduos da construção civil em Campo Grande e analisar os impactos provocados por ações estratégicas alocadas no PIGRCC e PCSCG no tocante à logística reversa do RCC. Também foi verificado as possíveis soluções nas lacunas existentes para contribuir com o aperfeiçoamento da gestão dos resíduos na cidade de Campo Grande - MS.

2 | METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa e posterior avaliação do PIGRCC e do PCSCG, foram coletados e analisados dados da PMCG, por meio do site da Prefeitura[5] para a gestão eletrônica dos RCCs na cidade[6]. Este sistema fornece os balanços de massa das áreas de destinação de RCCs, as ATTs cadastradas conforme Decreto Municipal nº 13.754/2019[7].

Após análise, plotou-se um gráfico para melhor visualização do problema em Campo Grande, sendo possível analisar a capacidade de armazenamento de cada local, a quantidade de entrada e saída de RCC e a taxa de ocupação de cada ATT. Também foi estimado a vida útil de armazenamento de RCC na cidade.

O balanço de massas é caracterizado pela diferença da capacidade de armazenamento e processamento do RCC no empreendimento (analisado durante os processos de licenciamento ambiental) como os registros de saída de resíduos triados e/ou processados na unidade da empresa, podendo ser resíduos recicláveis, perigosos e/ou processados (agregados reciclados).

Considerando a vigência do Decreto nº 13.754/2019[7], o período escolhido para a análise dos balanços de massa foi de março de 2019 até agosto de 2020 (já que esses dados foram entregues em setembro de 2020 para o Ministério Público). Mensalmente, os responsáveis pelas ATTs devem apresentar à SEMADUR (Secretaria do Meio Ambiente e Gestão Urbana) os relatórios contendo a quantidade mensal e acumulada de resíduos recebidos; a quantidade e destino dos diversos tipos de resíduos triados, com os respectivos comprovantes; e a relação de transportadores usuários no mês vigente[4].

3 | RESULTADOS

Atualmente, em Campo Grande, estão em funcionamento 3 ATTs de RCCs, os quais são o destino de 76 empresas de caçambas licenciadas; e 5 Ecopontos. A gestão do RCC em Campo Grande é realizada através do Controle de Transporte de Resíduos por meio eletrônico (E-CTR), na qual para a prestação dos serviços referentes a coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos inertes; a pessoa física ou jurídica deverá cadastrar-se na Agência Municipal de Transporte e Trânsito (AGETRAN) e apresentar a documentação solicitada, como declaração de destinação final e regularidade fiscal. Os transportadores do RCC deverão emitir um E-CTR para cada viagem que for realizada e no ato da descarga nas áreas de destino, os mesmos deverão ser baixados imediatamente. Assim, a prefeitura tem o controle de todo resíduo transportado, desde o gerador até a unidade de destinação, isto é, quando feito legalmente.

Para a análise dos balanços de massa foi considerado a capacidade instalada para armazenamento e processamento (volume) cadastrado no sistema e a disponibilidade calculada para armazenamento de resíduos, ou seja, já descontados os lançamentos de resíduos processados (agregados reciclados) e o volume de saída dos resíduos triados registrados através da E-CTR de ATTs emitidas. Nas empresas onde houve retiradas, foi apenas indicado que este procedimento ocorreu, entretanto não foi informado o volume e nem se o material de saída passou por algum beneficiamento (ex: britagem).

A figura 1 apresenta os balanços de massa mensal de cada empresa e, respectivamente, sua capacidade instalada. Através dos dados analisados é possível concluir que inicialmente na empresa 1 houveram algumas saídas, mas estas sempre foram menores que os valores de entrada, ocasionando um acúmulo no volume de RCC. Em abril/2020, atingiu-se a capacidade máxima de armazenamento (182.400,00 m^3), porém continuou havendo deposição de resíduos. Pela legislação, esta empresa deveria ser bloqueada no sistema, não podendo continuar a realizar os lançamentos até haver alguma retirada. Porém, observa-se que os lançamentos continuaram até junho de 2020, quando houve alguma retirada, mas continuou excedendo o limite da capacidade utilizada. Apenas em agosto houve uma grande retirada, possibilitando liberação do sistema para lançamentos de RCC no local, entretanto não foi informado qual a destinação das retiradas.

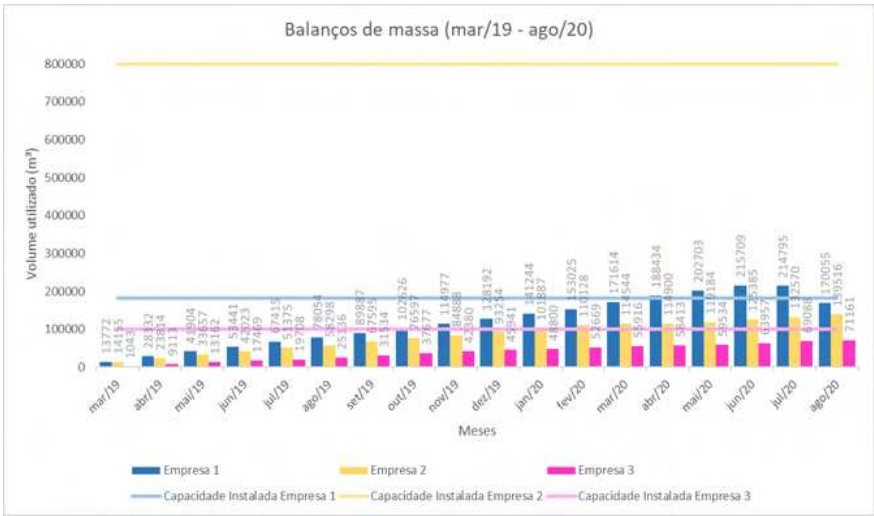


Figura 1 - Balanços de massa das 3 empresas receptoras de RCC

Fonte: Autora (2021)

A segunda empresa é a que possui maior capacidade instalada (800.000,00 m³). Em seus balanços de massa não consta nenhuma saída, ou seja, todo o resíduo depositado permanece no local.

A terceira empresa analisada lançou saída em seu balanço de massa, porém não foi mencionado qual a destinação. É perceptível que mesmo ocorrendo saída, o acúmulo de RCC permanece. A empresa estava próxima de atingir sua capacidade instalada (100.000,00 m³).

Considerando esses lançamentos, foi possível encontrar a média de recebimento de resíduo em cada empresa e, consequentemente, da cidade (média total de recebimento resultou em 1.046,34 m³/dia de RCC). Com isso, foi projetado a vida útil de cada ATT e, consequentemente, a do município. Em 31/08/2020 a taxa de ocupação dos ATTs em Campo Grande era de 64,84% (702.107,60 m³). Estimando o mesmo ritmo de crescimento (considerando as entradas e as saídas), a capacidade máxima de armazenamento de RCC na capital seria atingida em 03/07/2022, o que é muito preocupante.

Nota-se que a administração municipal possui o controle dos RCCs desde o gerador até a unidade de destinação, porém a falta da implementação da logística reversa proporciona o acúmulo de resíduos nas ATTs. Conforme os dados do E-CTR, em média, são gerados e depositado mensalmente nas áreas de destinação final 244.591,7 m³ de RCC.

Maia (2020)[8] realizou algumas entrevistas com os agentes que estão diretamente envolvidos no processo de logística reversa dos RCCs em Campo Grande. Segundo as empresas receptoras e recicladoras dos resíduos, em 75% dos pátios está ocorrendo empilhamento de entulhos recebidos. Elas alegam três principais fatores para que

isso ocorra: a quantidade de entulho recebida é muito alta, o maquinário utilizado na reciclagem (britadores, pás carregadeiras, esteiras rolantes, entre outros) não dão conta da grande quantidade que chega nos pátios e não existe uma destinação final exata para o material triado e processado, ou seja, fica no pátio esperando alguém ter interesse. Uma das causas dessas ocorrências pode ser falha na planta fabril, pois como a demanda é alta, os aterros devem estar preparados para receberem os resíduos que chegam e caso não exista uma boa organização/produtividade do local para triagem, pode acabar gerando grandes acúmulos. Outra explicação pode se dar pela falta de planejamento das empresas, onde não há um estudo para tentar estimar a quantidade que irá chegar e sair dos pátios. Por fim, um terceiro motivo seria a falta de interesse por parte do setor da construção na utilização desse tipo de material reciclado.

Ainda segundo Maia (2020)[8], com relação a procura aos produtos reciclados, os respondentes alegaram que existe de pouca a moderada procura. Tais respostas podem ser explicadas por diversos fatores como: a falta de um controle de qualidade maior que garanta ao consumidor um produto de qualidade, ausência de incentivos e propagandas para melhorar a imagem do reciclado no mercado, falta de interesse dos próprios consumidores, entre outros.

Segundo o PCSCG[9], a administração municipal deve sempre prezar pela saúde pública e ambiental e pelo princípio da precaução, portanto, caso não exista interesse do setor privado em atuar no manejo de RCCs e volumosos (resíduos vegetais), cabe à Prefeitura Municipal oferecer soluções para a destinação dos resíduos recebidos na rede pública de Ecopontos e ATTs.

Em 2018 a PMCG lançou um edital na modalidade pregão eletrônico para o registro de preços para futuras contratações de 805.700m³ de material de revestimento primário para manutenção de estradas vicinais, divididos igualmente em dois lotes, sendo que o lote 2 deveria ser integralmente de materiais provenientes de reciclagem de RCC, seguindo as especificações do item 4 – Materiais da ABNT 15115/2004[10]. Houve a ata de registro de preço (nº 29/2019) e concluiu-se que o valor da aquisição de RCC reciclado é 10,65% menor que o valor do material convencional, o que demonstra a viabilidade econômica. A viabilidade técnica já havia sido comprovada por testes realizados pela equipe da Prefeitura. Porém, a quantidade de material reciclado utilizado pela Prefeitura até hoje está muito aquém do que foi contratado, havendo prejuízo na manutenção dessas estradas. A Prefeitura alega que a pandemia comprometeu os trabalhos.

O PCSCG[9] apontou que no ano de 2018 deveria ter sido implantado o Aterro de Reservação de RCC Classe A (classificação conforme Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, que classifica os resíduos classe A como recicláveis)[11]. O Aterro de Reservarão de RCC Classe A receberia todos os resíduos já triturados e limpos, objetivando sua reservação para possibilitar o uso futuro desses materiais. Estes poderiam ser utilizados para manutenção de estradas vicinais, regularização de valas, concretos para fins não estruturais, fabricação de calçadas e meios-fios, entre outros. Porém, ainda não foi implementado e não há previsão de instalação. Já para o ano de 2021, era para ter sido instalado 12 Ecopontos espalhados pela cidade, porém atualmente só há 5. Logo, verificou-se que o fomento a logística reversa para incorporação do RCC beneficiado ainda está incipiente.

O diagnóstico situacional do PCSCG[9] apontou deficiências nas ações relacionadas

com o manejo dos RCCs, configurando desafios a serem superados. Na Tabela 1 é possível acompanhar as responsabilidades da PMCG apontadas no PIGRCC e as respectivas propostas de melhorias para esta gestão do RCC.

Ações de Responsabilidade da Administração Municipal presentes no PIGRCC	Sugestões para melhoria ou solução da ação
Implantação de uma rede de pontos de entrega para pequenos volumes de RCC e resíduos volumosos (Ecopontos);	Iniciou-se a implantação, porém é lenta. Os locais para instalação já foram mapeados. Seria necessário realizar a implantação desses Ecopontos o quanto antes e fomentar a utilização pela população da região, diminuindo a distância Ecoponto x População.
Incentivar o poder privado a atuar no setor ou estruturar Áreas de Triagem e Transbordo de RCC (ATTs) e caso não haja interesse de tal setor o poder público deve estruturar e operar estas unidades cobrando dos grandes geradores;	Isenção de impostos para atrair empresas atuantes no setor. Doação de áreas para a instalação das ATTs.
Prever ações para a informação e educação ambiental dos munícipes, dos transportadores de resíduos e das instituições sociais multiplicadoras, definidas em programas específicos;	Promover ações nos bairros, junto à população. Divulgar informações de educação ambiental nos meios de comunicação (televisão e internet). Desenvolver cartilhas com ilustrações, de fácil compreensão.
Prever ações para o controle e fiscalização do conjunto de agentes envolvidos, definidas em programa específico;	Utilização da tecnologia à favor, com o mapeamento de descarte irregular através de imagens de satélite. Fiscalizar os lançamentos realizados na E-CTR com mais rigor.
Ações de incentivo ao reuso e redução dos resíduos na fonte de produção, definidas em programas específicos;	Redução de impostos municipais para quem utilizar o RCC em suas obras. Ensinar para a população os benefícios do resíduo reciclado e mostrar os seus variados usos. Realizar contratos com as empresas para garantir a utilização do agregado reciclado em todas as obras públicas.
Ações de incentivo à instalação no município de empresas recicladoras no que diz respeito aos resíduos de classes A e B, segundo a Resolução CONAMA nº 307/2002;	Isenção de impostos para atrair empresas atuantes no setor. Doação de áreas para a instalação das ATTs.
Identificação e o cadastramento dos grandes geradores e o credenciamento dos transportadores;	Já é feito por meio da E-CTR. É necessário haver uma fiscalização mais incisiva.
Interligação de sistemas de controles de ATTs, transportadores, Aterros de Reservação de RCC Classe A e demais integrantes.	Já é feito por meio da E-CTR.

Tabela 1 – Sugestões para melhorias na gestão do RCC para cada ação de responsabilidade da PMCG apontada no PIGRCC

Fonte: Autora (2021)

4 | CONCLUSÃO

É notório que a gestão municipal está engajada no controle e na execução da gestão dos RCCs na cidade. Foi possível observar que a quantidade de ATTs e Ecopontos existentes atende à demanda atual, porém operam no limite. O não fomento a logística reversa faz com que esses locais permaneçam cheios. Em breve será necessário a ampliação de locais para descarte dos resíduos. Nesta análise, o maior problema enfrentado pelo município é a falta de interesse da sociedade em geral em utilizar/aplicar o RCC beneficiado.

Ainda há deficiências nas ações relacionadas com o manejo dos RCCs em Campo Grande, configurando desafios a serem superados. Há atrasos nas implementações das metas propostas no PCSCG e falta de fiscalização nas ações do PIGRCC. Para uma maior valorização destes resíduos no âmbito municipal, importante se faz o envolvimento do Poder Público Municipal e dos demais atores envolvidos, caracterizados por pequenos e grandes geradores e prestadores de serviços, aplicando o princípio da responsabilidade compartilhada em sua gestão e gerenciamento.

REFERÊNCIAS

1. WANG, J. et al. **Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China**. Journal of Cleaner Production, v. 206, p. 1004–1014, 2019.

2. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020.** Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, p. 51, 2020.

3. CAMPO GRANDE. **Lei n. 4.864, de 7 de julho de 2010.** Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil e institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil de acordo com o previsto na resolução CONAMA n. 307/2002, no âmbito do município de Campo Grande – MS e dá outras providências. Diário Oficial de Campo Grande – MS, 9 de julho de 2010, p. 01-08.

4. CAMPO GRANDE. **Decreto n. 13.192, de 21 de junho de 2017.** Regulamenta a lei n. 4.864, de 7 de julho de 2010 que versa sobre o sistema de gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos e o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil, no âmbito do município de Campo Grande – MS. Diário Oficial de Campo Grande – MS, 21 de junho de 2017, p. 01-06.

5. PREFEITURA DE CAMPO GRANDE. **Coletas Online**. Disponível em: < http://campogrande.coletas.online/ >. Acesso em 07 de maio de 2021.

6. SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE E GESTÃO URBANA. **Coleta Seletiva**. Disponível em: < http://www.campogrande.ms.gov.br/semadur/canais/coleta-seletiva/ >. Acesso em 08 de maio de 2021.

7. CAMPO GRANDE. **Decreto n. 13.754, de 8 de janeiro de 2019.** Dispõe sobre as normas gerais para cadastramento e emissão de Controle de Transporte de Resíduos por meio Eletrônico (E-CTR) e dá outras providências. Diário Oficial de Campo Grande – MS, 9 de janeiro de 2019, p. 01-03.

8. MAIA, J. H. de O. **Contribuição para melhorias na gest**ão dos **resíduos da construç**ão civil em Campo Grande – MS. Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Civil.

9. PSCCG. Plano de Coleta Seletiva de Campo Grande – MS. **Versão final do plano de coleta seletiva, 2017**. Disponível em < https://pcscgdmtr.wixsite.com/coletaseletiva/downloads >. Acesso em 10 de março de 2021.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. ABNT NBR 15115: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

11. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n° 307, de 5 de Julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil**. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, Brasília, Diário Oficial da União, seção I, p. 95 a 96, 2002.



O CICLO DA GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA UFRGS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081152

ANTUNES; GISELLE REIS[1]; RODRIGUES; EVELINE ARAUJO[2]; SIMONETTI; CAMILA[3]
[1, 2, 3] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
ENGCIVIL.GISELLE@GMAIL.COM

RESUMO: A Universidade Federal do Rio Grande do Sul é responsável pela gestão dos resíduos sólidos gerados pela mesma, segundo a Lei Nº 12.305/2010. Com fins a redução do impacto ambiental, tem implementado políticas de gestão ambiental efetivas e aprimorado sua aquisição de dados. O uso de planilhas de controle da geração, coleta, transporte e destinação dos resíduos da construção civil; o tratamento e a graficação de dados no Painel de Dados da instituição, além de contribuirem para a transparência das informações requerida aos órgãos públicos, têm colaborado para melhoria contínua dos processos de gestão de resíduos na Universidade e assegura a destinação ambientalmente correta.

PALAVRAS-CHAVES: Gestão ambiental; resíduos de construção civil; universidade pública.

ABSTRACT: The Federal University of Rio Grande do Sul is responsible for managing the solid waste generated by it, according to the Brazilian law Nº 12.305/2010. To reduce environmental impact, effective environmental management policies have been implemented with the improvement of data acquisition. The use of control spreadsheets for the generation, collection, transport and disposal of civil construction waste; the treatment of data and the availability of graphics on the institution's Data Panel, in addition to contributing to the transparency of the information required from public corporations, has contributed to the continuous improvement of the University's waste management processes and ensured the environmental correct destination.

KEYWORDS: Environmental management; construction waste; public university.

1 | INTRODUÇÃO

Em 1983, foi criada pela Assembleia Geral da ONU, após uma avaliação dos 10 anos da Conferência de Estocolmo, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD. O objetivo da comissão foi promover audiências em todo o mundo e produzir um resultado formal das discussões. O documento resultante foi lançado em 1987, intitulado *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum), e foi a partir deste documento que a expressão desenvolvimento sustentável se tornou conhecida.

Alguns anos depois, em 1994, o sociólogo britânico John Elkington criou o *Triple Bottom Line* ou Tripé da Sustentabilidade. O método incorpora a visão ecológica nas empresas com base em três princípios: *People* (Pessoas), *Planet* (Planeta), *Profit* (Lucro), também conhecido como os 3Ps da Sustentabilidade.

Mais tarde, em setembro de 2015, na sede da ONU, em Nova York, nos Estados Unidos, na "Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável" foi assinada por todos os 193 países-membros a Agenda 2030. Os países signatários se comprometeram com o que hoje entendemos por desenvolvimento social, econômico e ambiental do planeta. Esta nova agenda estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para alcançar a prosperidade e o bem-estar de todos até 2030.

Desde 2017, a UFRGS participa do ranking de sustentabilidade internacional conhecido por *Green Metric*, o qual avalia as ações sustentáveis desenvolvidas por Instituições de Ensino Superior no mundo inteiro a partir de 69 indicadores. Resultante de todo o esforço conjunto realizado na gestão ambiental da UFRGS, os resultados estão cada vez melhores. De forma que, no ano de 2020, a UFRGS subiu 6 posições entre as Universidades brasileiras, ocupando atualmente o 8º lugar no país, 27º lugar na América Latina e o 224º lugar no mundo(1).

Entre os setores os quais se justifica a importância do desenvolvimento sustentável está o da construção civil, tendo em vista que a maneira como se constrói, se projeta e se opera uma edificação influencia no uso dos recursos naturais e na geração de resíduos sólidos. Do mesmo modo que o mundo vem se adaptando aos novos conceitos e ampliação das bases da sustentabilidade, as instituições públicas têm buscado se alinhar a este novo cenário.

Nesse contexto, esse artigo apresenta uma análise sobre a elaboração e a implementação de políticas de gestão ambiental dos resíduos sólidos produzidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por meio do ciclo da gestão de resíduos da construção civil na Universidade.

2 | POLÍTICAS AMBIENTAIS NA UFRGS

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), é uma instituição centenária, reconhecida nacional e internacionalmente. A primeira Política Ambiental na UFRGS, de 17 de agosto de 2005, foi estabelecida através da Portaria N° 2604; a criação da Coordenadoria de Gestão Ambiental em 12 de abril de 2007, através da Portaria N° 1227, a instituição do Sistema de Gestão Ambiental, em 29 de abril de 2008, através da Portaria N° 1461, da UFRGS.

Posteriormente, em 2015, o Ministério da Educação reforçou a necessidade do atendimento do Acórdão nº 528/2015 do Tribunal de Contas da União. Entre as várias ações a serem promovidas pelas universidades encontrava-se a necessidade de elaboração de seus respectivos "Plano de Gestão de Logística Sustentável", exigido pelo Decreto Nº 7746/2012. O Plano de Gestão de Logística Sustentável se constitui em uma ferramenta de planejamento que permite estabelecer práticas de sustentabilidade e racionalização de gastos e processo na Administração Pública.

Então, em maio de 2016, a UFRGS implantou o seu Plano de Logística Sustentável (PLS) em atendimento a Instrução Normativa Nº 10, de 12 de novembro de 2012, da Secretaria de Logística e Tecnologia da informação, do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, a qual estabelece as regras para elaboração dos planos. O PLS UFRGS foi estruturado em 22 planos de ação de acordo com cinco eixos: gestão, pessoas, infraestrutura, consumo e uso de recursos naturais. O objetivo do PLS é consolidar,

aprimorar e integrar as boas práticas de sustentabilidade já existentes na UFRGS e propor diretrizes para novos projetos e ações que estimulem o comportamento sustentável[2].

Somando a este histórico de esforços em prol da implementação da sustentabilidade e gestão ambiental na UFRGS, o Departamento de Meio Ambiente e Licenciamento (DMALIC) da UFRGS se une. Assim, tendo em vista à preservação e conservação ambiental na UFRGS, o DMALIC apresentou uma minuta de protocolo ambiental a ser dirigido para cumprimento de todas as Unidades acadêmicas e técnicas da Universidade. Sendo formalizado pela Superintendência de Infraestrutura (SUINFRA), através da Circular nº 004/2019/SUINFRA, em 07 de outubro de 2019, foi encaminhado para ampla divulgação e implementação na instituição. No documento foram descritos procedimentos relativos aos aspectos ambientais que tange a execução de obras e reformas; gestão de resíduos sólidos; manejo de vegetação; manejo de fauna sinantrópica e produtos perigosos.

3 | O CICLO DA GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA UFRGS

A UFRGS possui várias vertentes de atuação para implementação de melhorias na gestão de resíduos da construção civil (Figura 1), que vão desde o aprimoramento contínuo dos contratos de projetos e obras; passando pela educação ambiental; pelo aprimoramento contínuo da gestão e fiscalização de contratos de resíduos; até a publicidade e transparência das informações relativas aos resíduos gerados.

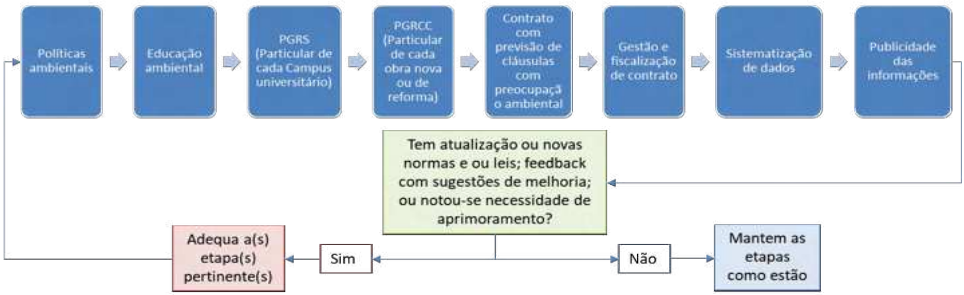


Figura 1 – Ciclo da gestão de contratos de resíduos da UFRGS

Fonte: os autores (2021)

Entre as iniciativas relativas aos projetos e obras destacam-se por exemplo o uso da tecnologia *Building Information Modelling*, ou adoção de práticas sustentáveis na fiscalização de obras públicas. Para o caso de contratação de projetos, a solicitação da entrega do mesmo com modelagem arquitetônica dos prédios utilizando a tecnologia *Building Information Modelling* (BIM), em português Modelagem da Informação da Construção. Esta é uma importante ferramenta para a avaliação da sustentabilidade de uma edificação, uma vez que reúne informações geradas e mantidas durante todo o ciclo de vida de um edifício. A utilização do BIM torna os projetos mais realistas, permite simular situações e possíveis soluções para um determinado projeto, o que traz um

resultado direto para a sustentabilidade de uma edificação. É possível, por exemplo, reduzir a quantidade de resíduos de construção; avaliar a eficiência energética; ajudar a calcular o volume de água necessário para uma determinada construção; testar diversas soluções que tragam a menor pegada de Carbono por meio de recursos que o BIM proporciona.

Com intuito de atender à legislação municipal de Porto Alegre, as empresas contratadas devem apresentar à fiscalização da obra, junto com as documentações de início, a Tabela para Especificação e Quantificação de Resíduos e o Formulário Sobre o Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) devidamente preenchido e assinado pelo responsável técnico. No decorrer da obra, a contratada deve emitir relatórios mensais de descarte de resíduos, tais relatórios deverão estar de acordo com o PGRCC da obra e preenchidos em documentos fornecidos pela fiscalização da UFRGS.

No caso de inexigibilidade de PGRCC ou inexistência do mesmo, os resíduos de construção civil, de demolições e os resultantes da escavação de solos devem ser dispostos em locais adequados às normas previstas na Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), e conforme a Lei Municipal 10.847/2010 que institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do Município de Porto Alegre e o Decreto nº 18.481/2013.

A educação ambiental na UFRGS é muito valorizada e adotada como estratégia fundamental para que a comunidade acadêmica se torne cada vez mais consciente quanto à adoção de práticas ecologicamente corretas com fins à sustentabilidade. Neste sentido, são promovidas periodicamente capacitações institucionalmente, tais como: Semana do Meio Ambiente da UFRGS, treinamento sobre "Gestão de resíduos sólidos na UFRGS" e treinamentos com as equipes terceirizadas de limpeza interna e externa, objetivando o atendimento das práticas ambientais por esses colaboradores, principalmente no que se refere ao gerenciamento interno de resíduos sólidos.

No que tange ao aprimoramento contínuo da gestão e fiscalização de contratos de resíduos, vale ressaltar que a UFRGS firma contratos de coleta, transporte e destinação adequada dos seus resíduos, considerando as características e a classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004[(3)], Resolução CONAMA N° 307/2002, Resolução CONAMA Nº 358/2005 e RDC ANVISA Nº 222/2018. Estes serviços, portanto, são realizados de forma periódica e contínua, na instituição, de modo que sua não realização além de acarretar possível dano ambiental e à saúde humana ou animal, pode incorrer em infrações administrativas.

É importante frisar que a UFRGS utiliza como base legal para o gerenciamento de seus resíduos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010[(4)]. Entre as obrigatoriedades da PNRS, para os grandes geradores de resíduos como a UFRGS, está a de elaboração e implantação dos Planos Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRSs). Os PGRSs são elaborados por campus universitário. Atualmente, a UFRGS é composta por cinco Campi e diversas unidades dispersas, com 461 prédios fazendo parte do seu patrimônio. Nos PGRSs são definidas todas as etapas do sistema de gerenciamento de resíduos daquele campus, desde a geração até a sua destinação final ambientalmente adequada.

O Campus do Vale foi o primeiro a ter o seu PGRS elaborado e implantado, o documento, criado em 2014, foi atualizado em 2019 e contempla todas as unidades acadêmicas e administrativas do Campus. O Campus Litoral Norte também possui PGRS

desde 2016 e, atualmente, está em fase de atualização. Além desses dois *campi*, o CECLIMAR também conta com um PGRS, o qual foi atualizado em 2019.

Com o intuito de manter controle e aperfeiçoar o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos, contemplando as etapas de geração, coleta, transporte e destinação final, os dados são sistematizados em planilhas de Excel. São boletins que contemplam a identificação dos contratos vigentes nesta Universidade inerente a cada classe de resíduo, identificação do tipo, origem e quantitativo de resíduos, bem como o valor despendido com a destinação ambientalmente adequada dos mesmos.

Posteriormente ao tratamento destes dados, o quantitativo dos resíduos gerados é disponibilizado através de gráficos no Painel de Dados da instituição[5]. A publicidade dos dados, além de contribuir para a transparência das informações requeridas aos órgãos públicos, têm colaborado para melhoria contínua dos processos de gestão de resíduos na Universidade.

Os principais modelos de planilhas de controle de geração, coleta, tratamento e destinação final de resíduos da construção civil na UFRGS, são demonstrados nas Tabelas 1 e 2, para Classes A e B e Classe C, respectivamente.

CONTROLE DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL - CLASSES A E B - CLN - 2019					
JANEIRO					
Data da Coleta	**N° MTRCC**	**Classe de RCC**	**TIS**	**TRU**	**Qtde. coletada**
TOTAL MÊS					

Tabela 1 – Modelo de planilha de controle de geração e recolhimento de RCC – Classes A e B

Fonte: os autores (2021)

CONTROLE DE GERAÇÃO E RECOLHIMENTODE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL - CLASSE D - 2019						
JANEIRO						
Data da Coleta	**N° MTR**	**N° CDF**	**Material**	**TIS**	**TRU**	**Qtde. coletada**
			Madeira Tratada (container 5 m³)			
TOTAL MÊS - Latas de tinta (m³)						
TOTAL MÊS - Madeira tratada (caçamba 5 m³)						
TOTAL MÊS - Material de pintura (bombona 100 l)						

Tabela 2 – Modelo de planilha de controle de geração e recolhimento de RCC – Classes D

Fonte: os autores (2021)

Os resíduos da construção civil são classificados, conforme resolução CONAMA nº 307/2002, nas classes A, B, C e D. Os resíduos da classe A, caracterizados como reutilizáveis ou recicláveis como agregados, são destinados a usinas de reciclagem de RCC e transformados em subprodutos como areia, brita e pedrisco, por meio de empresas contratadas. Já os resíduos da classe B são caracterizados por plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso. Esses resíduos são destinados para unidades de triagem e reciclagem com este fim, por meio de empresas contratadas pela UFRGS.

Além disso, também são gerados na UFRGS os resíduos da construção civil da classe D, caracterizados como resíduos perigosos, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. Esses resíduos são destinados para aterro especial (classe I), por meio de empresas contratadas.

Em atividades de manutenção civil realizadas pelas Prefeituras Universitárias da UFRGS, os resíduos sólidos são segregados no momento da geração em três classes principais: A, B e D. O armazenamento temporário dos RCCs das classes A e B ocorre, separadamente, em caçambas abertas de 4m³, identificadas com a classe do resíduo. Já os RCCs da classe D são armazenados conforme o tipo de resíduo: latas de tinta e madeiras beneficiadas (contaminadas) são armazenadas, separadamente, em caçambas fechadas de 5m³, de forma a evitar possíveis acidentes e transbordo da carga. Os demais materiais contaminados com tinta, como EPIs, estopas e pincéis, são acondicionados em bombonas plásticas de 100l, com tampa rosqueável.

O transporte e a destinação final dos RCCs na UFRGS ocorrem mediante a emissão de MTRCC Online ou MTR FEPAM. O Manifesto de Transporte de Resíduos da Construção Civil Online (MTRCC), estabelecido pelo Decreto Municipal de Porto Alegre nº 20.368, de 2 de outubro de 2019, tem como finalidade controlar a geração, o transporte e a destinação final dos RCCs no Município de Porto Alegre. Esse documento é emitido através do Sistema de Gestão de Resíduos (SGR) de Porto Alegre e é obrigatório para os RCCs das classes A, B e C. Para os RCCs dessas classes, gerados no Campus Litoral Norte, utiliza-se o MTR FEPAM, isso porque o município de Tramandaí-RS não possui sistema prório para o controle dos RCCs.

Para os RCCs da classe D, considerado resíduo Classe I - Perigoso, o documento utilizado é o MTR FEPAM, tanto para os campi de Porto Alegre quanto para o Campus Litoral Norte. A utilização do Sistema MTR FEPAM é legalmente exigida no Estado do RS de acordo com a Portaria FEPAM Nº 87/2018 e suas alterações, na qual dispõe sobre a obrigatoriedade de utilização do Sistema e dá outras providências. Dessa forma, antes de cada coleta de RCC na UFRGS, os fiscais técnicos lotados nas Prefeituras Universitárias emitem o MTRCC ou MTR e esses são registrados, eletronicamente, pelo transportador e destino final.

Em caso de obras ou serviços contratados externamente, o pagamento do recolhimento de resíduos é condicionado à apresentação do MTRCC Online e/ou Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), de acordo com a classificação do resíduo, bem como à apresentação de licenças ambientais de transporte (para os RCCs - classe D) e de destino final (para todos os RCCs). Caso os procedimentos de controle de transporte de resíduos exigidos não sejam observados, a fiscalização da UFRGS poderá paralisar a obra ou serviço, inclusive solicitar a presença da Secretaria Municipal do

Meio Ambiente ou da FEPAM para providências cabíveis.

Os RCCs classe A são destinados diretamente para usinas de reciclagem, que transformam o resíduo em "agregado reciclado". Esses materiais, provenientes do beneficiamento de RCCs classe A, como areia, brita e rachão, apresentam características técnicas potenciais para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, ou outras obras de engenharia.

Já os RCCs classe B quando chegam ao destino são triados nas seguintes categorias: papel colorido, papel branco, plásticos, PVC, PET, pneus, gesso, sucatas metálicas, entre outras. Após a triagem, esses resíduos são armazenados temporariamente na empresa e destinados, periodicamente, para empresas recicladoras, de acordo com o tipo de material. Nos campi de Porto Alegre, quando há a geração de RCCs classe B em menor quantidade, como nos laboratórios de engenharia, os mesmos são coletados e transportados pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), através do Convênio N° 290/2020 celebrado entre o DMLU e a UFRGS, e encaminhados para cooperativas de reciclagem.

Por fim, os RCCs classe D, são encaminhados para uma central de resíduos classe I, que realiza, para a maioria dos RCCs (classe D), a disposição final ambientalmente adequada em aterro classe I. Quando há a geração de tinta líquida à base de solvente, a tecnologia adotada pela central, é o coprocessamento, que é a utilização dos resíduos como combustíveis alternativos na produção do cimento.

A forma de comprovação da destinação dos RCCs das Classes A, B e C gerados nos campi de Porto Alegre se dá por meio do sistema MTRCC online, onde o destino final registra "Recebido" no documento. Já os RCCs gerados no Campus Litoral Norte, bem como os RCCs da Classe D, o destino final emite o Certificado de Destinação Final (CDF) no sistema MTR FEPAM, o qual assegura a destinação ambientalmente adequada dos mesmos.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de planilhas de controle da geração, coleta, transporte e destinação dos resíduos da construção civil; o tratamento de dados e a disponibilização de gráficos no Painel de Dados da instituição, além de contribuir para a transparência das informações requerida aos órgãos públicos, tem colaborado para melhoria contínua dos processos de gestão de resíduos na Universidade uma vez que amplia a percepção da realidade tanto para gestores quanto para a própria comunidade acadêmica.

REFERÊNCIAS

1. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Participação no Ranking Green Metric**. 2020. Disponível em: www.ufrgs.br/sustentabilidade/2019/10/16/participacao-no-ranking-green-metric/. Acesso em: 02 jun. 2021.

2. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Plano de Logística Sustentável**. 2016. Disponível em: http://www.ufrgs.br/ufrgs/a-ufrgs/plano-de-logistica-sustentavel/view. Acesso em: 02 jun. 2021.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004:** Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

4. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, 3 ago. 2010.

5. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Painel de Dados**. 2021. Disponível em: https://www1.ufrgs.br/paineldedados/sustentabilidade/telaResiduos. Acesso em: 02 jun. 2021.

ANÁLISE SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE/RS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081153

ROCHA, PAULYNE VAZ[1]; SOUZA; ANA LILIAN BROCK DE[2]; PETRY, NATÁLIA DOS SANTOS[3]
[1]CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS - UNIRITTER; [2] UNIRITTER; [3] UNIRITTER.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: NATALIAPETRY@YAHOO.COM.BR

RESUMO: A construção civil é responsável por gerar grandes impactos ambientais. Buscar medidas para minimizar a geração de resíduos da construção civil e realizar sua destinação correta, apresentam-se como alternativas viáveis à redução destes impactos. O objetivo deste estudo é identificar locais utilizados para o descarte regular em Porto Alegre/RS e sua relação com as obras em andamento. Como metodologia, foram mapeados os pontos de descarte regular e foram levantadas as edificações em construção. Conclui-se que não há quantidade adequada de aterros licenciados para receber a demanda de resíduos gerados pela construção civil e os existentes encontram-se afastados das fontes geradoras.

PALAVRAS-CHAVES: Gestão; Resíduos da construção civil; Impactos Ambientais; Porto Alegre/RS.

ABSTRACT: Civil construction is responsible for generating major environmental impacts. Searching for measures to minimize the generation of civil construction waste and carrying out its correct destination are viable alternatives for reducing these impacts. The purpose of this study is to identify places used for regular disposal in Porto Alegre/RS and their relation with ongoing works. As a methodology, regular disposal points were mapped and buildings under construction were surveyed. It is concluded that there is no adequate amount of licensed landfills to receive the demand for waste generated by civil construction and the existing ones are far from generating sources.

KEYWORDS: Management; Civil construction waste; Environmental impacts; Porto Alegre/RS.

1 | INTRODUÇÃO

O constante aumento do consumo nas cidades brasileiras proporciona uma grande geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). No Brasil, entre os anos 2010 e 2019 foi registrado uma crescente na produção de resíduos de 67 milhões para 79 milhões de toneladas ao ano, ou seja, um crescimento de 12 milhões de toneladas de RSU (ABRELPE, 2020) (1). Enquanto no Rio Grande do Sul, somente no ano de 2014 foram geradas mais de 3 milhões de toneladas de RSU, segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul (PERS, 2014).

De acordo com Fernandez (2012)(2), os Resíduos da Construção e Demolição (RCD) representam 61% dos Resíduos Sólidos Urbanos. No panorama brasileiro, em

2010 foram produzidas 33 milhões de toneladas, já no ano de 2019 este valor chegou a 44,5 milhões de toneladas, um acréscimo de 11,5 milhões de toneladas em 10 anos.

Ainda segundo Fernandez (2012)[2], no Rio Grande do Sul, somente 50% dos municípios gaúchos possuem serviços de manejo de RCC e apenas 21 municípios possuem processamento do mesmo. A taxa de geração de RCC no estado foi de 520 kg/hab.ano, sendo uma geração de aproximadamente 5 milhões de toneladas no ano de 2014. De acordo com o PERS (2014) [3], Porto Alegre gerou em 2014 entre 240 a 750 mil toneladas de RCC.

De acordo com a Resolução do Conama nº 307 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002)[4], os RCC são classificados em Classe A, B, C e D. Sendo de responsabilidade dos geradores a destinação correta.

Pelo levantamento da FEPAM/RS em parceria com o Engebio (2014) [3], no Estado do Rio Grande do Sul (RS), atualmente existem quatorze unidades de destinação de RCC licenciadas, sendo: sete aterros inertes, localizados em sua maior parte na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA); três centrais de triagem, sendo uma na RMPA, uma no litoral norte e outra a noroeste do estado; quatro centrais de transbordo, duas na RMPA, uma no litoral norte e outra a sudoeste do Estado. Observa-se a ausência de unidades de destinação para a região sul do RS.

Buscar áreas de destinação licenciadas para os RCC, junto aos órgãos públicos, é fundamental para auxiliar na redução dos impactos ambientais causados pela construção civil. Quanto maior a quantidade de obras, maior serão as gerações de RCC, logo conhecer o potencial do mercado imobiliário das cidades é uma forma de avaliar se as destinações existentes apresentam capacidade de recebimento.

A pandemia do Covid-19 afetou diversos setores, inclusive o imobiliário e a construção civil. Segundo o Sistema Cofeci/Creci, a compra de apartamentos novos cresceu 26,7% no primeiro trimestre de 2020. Em março de 2020 foi oficialmente decretada pandemia, o que provocou uma redução no crescimento do setor imobiliário, no segundo trimestre. Entretanto já no segundo semestre observou-se sua retomada.

Conforme o PMGIRS (DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA, 2013) [5] a estimativa de produção de RCC em Porto Alegre, no ano de 2022 é de 816,49 t/dia, o que distribuido pela população do último censo demográfico (IBGE, 2010) [6] do total de 1.409.351 hab na capital gaúcha, equivaleria a uma produção de, aproximadamente, 0,58 quilos por habitante ao dia. Reischl (2015) [7], chama a atenção que a estimativa de geração diária estabelecida pelo DMLU está abaixo de outros levantamentos encontrados na literatura, como John (2001) [8] que estabelece uma produção de 500 quilos per capita por ano e, consequentemente, 1,6 kg diários.

Segundo Reischl (2015)[7] para a análise da quantidade de produção de RCC, deve-se considerar a metodologia sugerida por Pinto e Gonzalez (2005)[9] que: “indicam que para se obter uma estimativa global de geração de resíduos deve-se levar em conta as quantidades geradas em novas edificações, as quantidades provenientes de reformas, ampliações e demolições, e as quantidades recolhidas pelos serviços de limpeza urbana” e para tal os autores estabelecem uma “quantidade de geração de 150 kg de RCC a cada novo m² construído”.

Reischl (2015) [7] indica que a média mensal de área aprovada pela Secretaria Municipal de Urbanismo (SMURB) em Porto Alegre é de 111.530,9m² ou uma média de

4.289,65m² ao dia, considerando 26 dias úteis no mês. Se os m² executados diariamente forem multiplicados pelos 150kg de RCC sugeridos, tem-se um total de 643.447,5 kg de RCC produzidos em Porto Alegre por dia, ou 0,456kg/hab.dia.

Frente a esse panorama, o presente trabalho propõe a análise da relação entre a produção e descarte de resíduos da construção civil na cidade de Porto Alegre/RS. Mais precisamente, avaliar a quantidade de resíduos produzidos pelas obras em construção em Porto Alegre e a capacidade de recebimento das empresas licenciadas pelo DMLU local. Além disso, o estudo pretende verificar as distâncias mínimas de abrangência entre os pontos de geração e de descarte de resíduos.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A análise empírica parte do estudo da distribuição espacial dos pontos de geração e descarte correto de RCC em Porto Alegre/RS, mapeados no software online gratuito Google My Maps (Google, 2021) [10], através de seus endereços.

Para o levantamento dos endereços, os pontos de demanda foram mapeados através das informações fornecidas pelos principais sites de compra e venda de imóveis de Porto Alegre: Viva Real e Zap Imóveis (Lançamentos e imóveis novos à venda em POA - RS, 2021) [11,12]. Para a análise foram considerados os imóveis classificados como lançamentos, já que estes encontram-se em construção. Optou-se por essa fonte de dados por ela conter o endereço dos empreendimentos, permitindo que eles fossem demarcados no mapa, além disso tais sites são constantemente atualizados. Ressalta-se aqui a dificuldade de obter esses endereços junto aos órgãos de fiscalização da construção civil devido a cláusulas de sigilo entre os pares.

Os dados referentes aos pontos de coleta adequados do RCC foram obtidos no site do departamento municipal de limpeza urbana (DMLU, 2021)[13]do Município de Porto Alegre/RS. São incentivadas duas formas de efetuar o descarte correto dos resíduos da construção civil: através dos ecopontos, também conhecidos como unidades de destino certo e, através das unidades de destinação final licenciadas. Os Ecopontos são voltados para o recebimento de pequenas cargas de RCC, quantidade máxima 0,5 m³/dia por consumidor, enquanto as unidades licenciadas dependem da sua capacidade de processamento diário permitindo que quantidades acima de 0,5m³/dia sejam recebidas. Como o foco do trabalho são geradores de resíduos que produzem mais de 0,5m³ ao dia, os ecopontos não foram considerados pontos de descarte para fins da análise.

Para o mapeamento dos pontos de geração e de descarte de RCC os endereços foram compilados em uma tabela excel, através da identificação do seu logradouro, número, bairro e cidade, sintetizada na Tabela 1. Assim que os dados são organizados, eles são importados como camadas no software Google My Maps[10]. O mapa base de análise é constituído de duas diferentes camadas: Empresas Licenciadas (sete pontos) e edificações em construção (quarenta e três pontos).

Empresa	Latitude	Longitude	Capacidade diária	Região que atende
A	-29.984085°	-51.191739°	400m³	Porto Alegre
B	30.084947°	51.133090°	1000m³	Porto Alegre
C	-30.146088º	-51.134632°	Informações não divulgadas	
D	-29.981866°	-51.192010°	146m³	Porto Alegre
E	-30.010231°	-51.144023°	Informações não divulgadas	
F	-29.966354°	-51.173488°	100 m³	Região Metropolitana
G	-29.877135º	-51.054256°	140m³	Região Metropolitana
H	-30.095200°	-51.237783°	60m³	Somente empresas conveniadas
Capacidade Total			**1846m³**	

Tabela 1 - Levantamento da localização e capacidade diária das empresas licenciadas para recebimento dos RCCs.

Após a conclusão do mapa base no Google My Maps os dados foram importados para o software QGis (QGIS.org, 2021) [14] onde as análises urbanas foram efetuadas. Primeiramente, foram criados quatro buffers com distâncias lineares a partir de cada empresa licenciada mapeada, para a análise optou-se pelas distâncias de 2,5km, 5km, 7,5km e 10km. Em cada buffer de análise verificou-se o número de obras abrangidas por cada ponto de descarte.

Na sequência foi realizada a análise das áreas de influência de cada empresa licenciada através dos polígonos de Voronoi. Os polígonos de Voronoi partem do príncipio de que as manchas de influência "não sejam compostas pela simples distribuição euclidiana, mas sejam deformadas pela influência do meio e pela massa de seus pontos geradores" (MOURA, 2009)[15]. De forma que é possível identificar a área máxima de influência de cada ponto levando em consideração o sistema como um todo, ou seja, é possível dizer que os polígonos de Voronoi são sensíveis aos outros pontos mapeados e sua interferência na relação entre oferta e demanda de cada serviço. Optou-se por acrescentar essa metodologia pois entende-se que que ela é mais sensível a realidade de distribuição do uso do solo nas cidades.

3 | ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com a metodologia proposta, foi possível mapear as obras em andamento na cidade de Porto Alegre/RS e os aterros de inerte, locais de destinação licenciada pelos órgãos públicos, apresentado na Figura 1. Nota-se que as obras estão concentradas na área central da cidade e os aterros estão localizados nas bordas periféricas da cidade, o que pode contribuir para um maior impacto ambiental, visto os deslocamentos que são necessários, entretanto sabe-se que os locais de instalação dos aterros devem ser mais afastados visto os possiveis impactos que podem provocar.

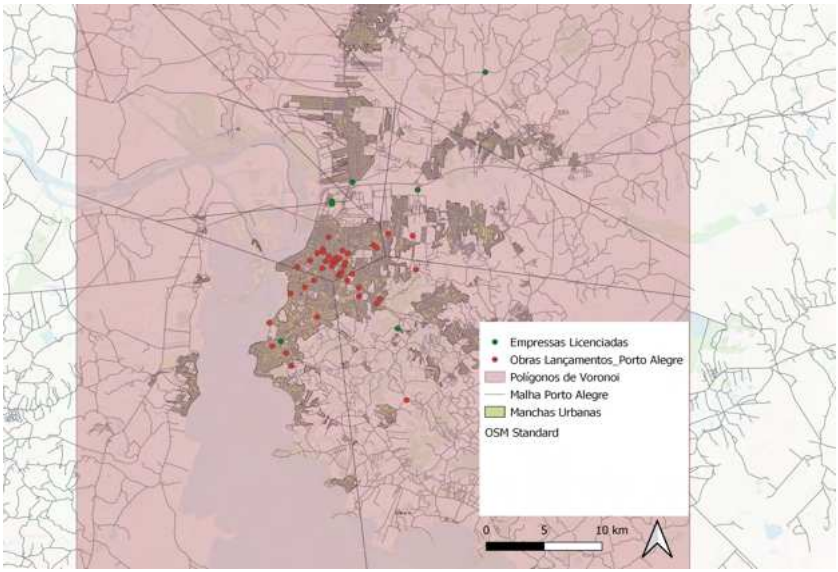


Figura 1 - Mapeamento de obras em andamento na cidade de Porto Alegre/RS e aterros de inertes.

Fonte: Mapa criado pelos autores utilizando software livre e gratuito Qgis

De acordo com Lordêlo et al. (2007) [16] os resíduos gerados pelo setor da construção civil, são responsáveis por aumentar o impacto ambiental provocado por este setor. Os autores, salientam que a geração de resíduos excessiva e seu descarte irregular, em grande parte das cidades brasileiras, contribuem para a poluição do ambiente urbano. Colaborando para a poluição do ar com gás carbônico liberado pelos veículos necessários para realizar o transporte dos resíduos.

Assim, é fundamental avaliar a distância entre as fontes geradoras de resíduos e os locais de destinação. Logo, foram simulados raios de abrangência para cada aterro, foram consideradas as distâncias de 2,5km, 5km, 7,5km e 10km, conforme demonstrado na Figura 2.

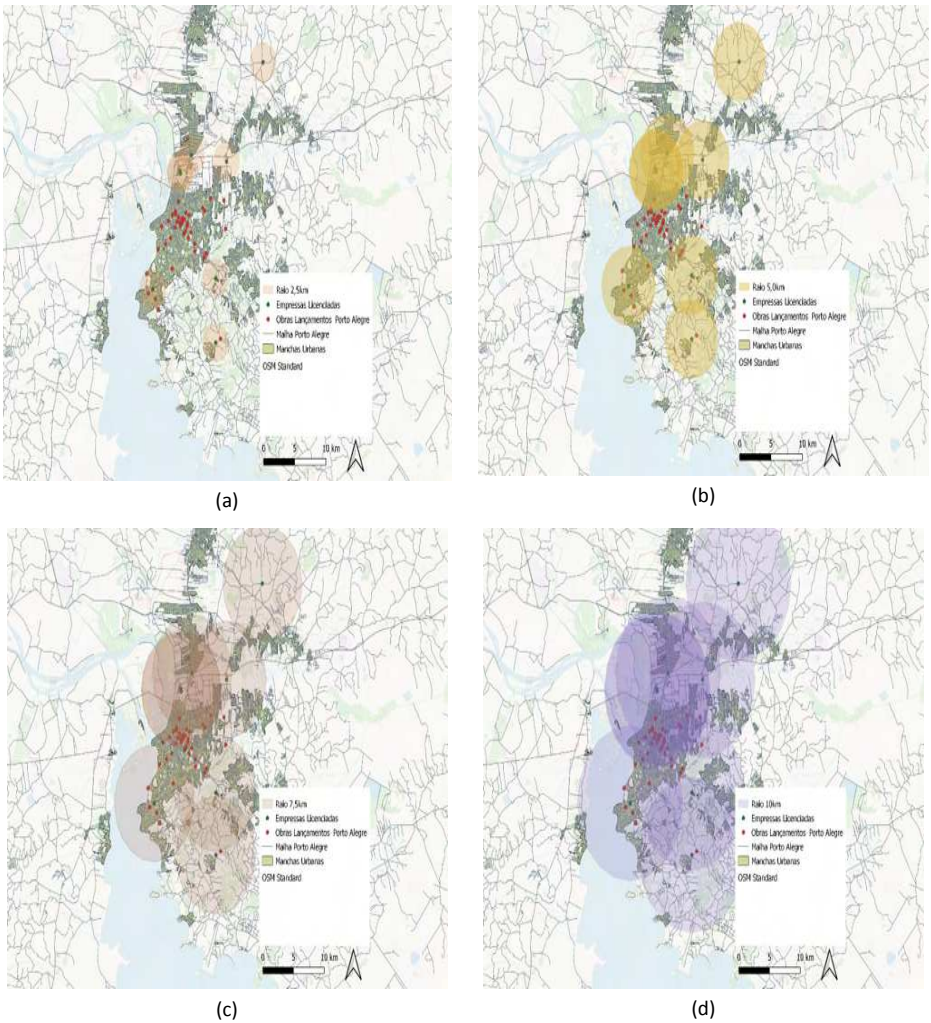


Figura 2 - Mapeamento das obras em andamento na cidade de Porto Alegre/RS e dos aterros de inertes. (a) 2,5km; (b) 5km; (c) 7,5km; (d) 10km.

Fonte: Mapas criados pelos autores utilizando software livre e gratuito Qgis

Analisando a Figura 2a, quando se considera um raio de 2,5km partido dos aterros, apenas quatro obras estão dentro desta delimitação. Avaliando a Figura 2b, quando se considera um raio de 5km, nota-se que doze obras estão nas áreas de abrangência. Nas Figuras 2c e 2d há uma sobreposição considerável dos raios, sendo assim foi notado que mais de uma empresa licenciada poderia receber os RCCs da mesma obra. Portanto, nas Figuras 4c e 4d, com raios de abrangência de 7,5km e 10km respectivamente, tem a abrangência total das quarenta e três obras.

Além de verificar a distância entre fonte geradora de RCC e destinação correta, é preciso analisar a quantidade que as obras atuais estão gerando, para isso considerando a metodologia de cálculo de quantidade de geração sugerida por Reischl (2015) [7] apresentada na introdução, é possível identificar que em Porto Alegre a produção média nas obra é de 4.289,65m² construídos ao dia, considerando as 43 obras em andamento mapeadas, o que representa uma geração de 643.447,5kg de RCC/dia (sendo que 1m² de construção gera 150kg de RCC), logo considerando a densidade aparente média dos Resíduos Sólidos indicada por de Vasconcelos e de Lemos (2015) [17], conclui-se que as obras em andamento na cidade geram aproximadamente 2.409,19m³ de RCC/dia. Comparando a quantidade estimada de RCC geradas nas obras em andamento na cidade de Porto Alegre/RS com a capacidade instalada dos aterros inertes licenciados pelos órgãos fiscalizadores, pode-se concluir que a capacidade não atende a quantidade gerada, sendo que este pode ser um dos motivos para a realização de descartes irregulares, entretanto são necessárias mais análises para se afirmar essa possibilidade.

Quando é analisada a distribuição das obras através dos Poligonos de Voronoi, percebe-se que a relação entre quantidade de obras por empresa licenciada se altera. Analisando a Tabela 2, verifica-se que 50% das empresas não possuem nenhuma obra na sua área de influência, enquanto a empresa A apresenta 25 obras na sua área de influência, o que corresponde a 58% de todas as obras mapeadas.

Empresa	N° Obras área de influência	Produção Média de RCC por obra/dia, em m³ considerando o total de 2.409,19m³ de RCC/dia	Capacidade diária empresas	Diferença entre RCC produzido e capacidade das empresas em m³
A	25	1400,69	400m³	-1000,69
B	7	392,19	1000m³	607,81
C	1	56,02	Não forneceram informações	
D	0	0	146m³	146
E	2	112,05	Não forneceram informações	
F	0	0	100 m³	100m³
G	8	448,22	140m³	-308,22
H	0	0	60m³	60m²

Tabela 2 - Levantamento da localização e capacidade diária das empresas licenciadas para recebimento dos RCCs através dos Polígonos de Voronoi.

4 | CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou um contexto geral dos Resíduos da Construção Civil (RCC) na cidade de Porto Alegre/RS e abordou a questão da destinação correta dos mesmos.

Atualmente, acredita-se que sejam produzidos em média na cidade, em torno de 644 t/dia de RCC. Considerando que no próximo ano, 2022, com a retomada das atividades ainda neste período de pandemia, é seperado que sejam produzidos ao

menos 816,49 t/dia, observando um aumento de 20% na geração de resíduos. Observou-se que a capacidade das empresas licenciadas para receber os RCC's não atendem a demanda atual da construção.

Quanto a distância míima de abrangência dos aterros para englobar todas os locais de geração dos RCC, conclui-se que o raio de 7,5km é o mais adequado na situação atual.

As informações apresentadas demonstram que no setor da Construção Civil existe uma grande geração de Resíduos da Construção Civil (RCC). Porém a dificuldade para a obtenção de dados das obras que estão em andamento foi devido ao sigilo de segurança dos órgãos responsáveis e a falta de resposta de algumas empresas licenciadas dificultou a análise completa.

Em virtude da interdependência do sistema utilizado, seria possível expandir esta mesma análise para outras cidades, avançando para estados e até no âmbito nacional.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2020), Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018-2019, disponível em: http://abrelpe.org.br/panorama/ (acesso em 22 abril 2021).

2. FERNANDEZ, Jaqueline Aparecida Bória. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012.

3. DO SUL, Rio Grande. Plano estadual de resíduos sólidos do Rio Grande do Sul 2015-2034 (PERS-RS). **Porto Alegre: Ministério do Meio Ambiente/Governo do Estado do Rio Grande do Sul/ FEPAM/RS/Engebio**, 2014.

4. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002.

5. DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Volume 1 – Diagnóstico e Prognóstico. Porto Alegre, RS, 2013. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmlu/usu_doc/pmgirs_porto_alegre_volume_1.pdf>. (acesso em 22 abril 2021).

6. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010:** Manual do Recenseador. CD 1.09. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

7. REISCHL, Paulo Forneck. **Gestão dos resíduos da construção civil: situação no município de Porto Alegre**. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

8. JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; DE BRUM, I. A. S. (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA, 2001. p. 28-45.

9. PINTO, T. de P.; GONZÁLEZ, J. L. R. (Coord.). **Guia profissional para uma gestão correta dos resíduos da construção**. São Paulo: Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado de São Paulo, 2005.

10. Google. 2021. **Porto Alegre/RS**:Google Maps. https://www.google.com.br/maps/preview

11. LANÇAMENTOS E IMÓVEIS NOVOS ÀS VENDA EM PORTO ALEGRE/RS. **Viva Real**, 2021. Disponível em: https://www.vivareal.com.br/imoveis-lancamento/porto-alegre/. (acesso em 21/04/2021).

12. LANÇAMENTOS E IMÓVEIS NOVOS ÀS VENDA EM PORTO ALEGRE/RS. Zap Imóveis , 2021. Disponível em: https://www.zapimoveis.com.br/lancamentos/imoveis/rs+porto-alegre/?onde=,Rio%20Grande%20do%20Sul,Porto%20Alegre,,,,,city,BR%3ERio%20Grande%20do%20Sul%3ENULL%3EPorto%20Alegre,-30.034647,-51.217658-&transacao=Venda&tipo=Lan%C3%A7amento&pagina=1. (acesso em 21/04/2021).

13. PORTO ALEGRE. DMLU. Departamento Municipal de Limpeza Urbana, disponível em: https://www2.portoalegre.rs.gov.br/smam/default.php?p_secao=359. (acesso em 22 abril 2021).

14. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org

15. MOURA, Ana Clara M. **Discussões metodológicas para aplicação do modelo de Polígonos de Voronoi em estudos de áreas de influência fenômenos em ocupações urbanas** – estudo de caso em Ouro Preto – MG. Anais VII Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos - ENABER, São Paulo, Brasil, 9-11 setembro 2009, FEA/USP.

16. LORDÊLO, Patrícia Miranda; DE ABREU EVANGELISTA, Patrícia Pereira; DE ALMEIDA FERRAZ, Tatiana Gesteira. **Gestão de Resíduos na Construção Civil: redução, reutilização e reciclagem**. Senai, 2007.

17. VASCONCELOS, Kelry Borges; LEMOS, Carlos Fernando. **Densidade aparente dos resíduos da construção civil em Belo Horizonte–MG**. 2015.



CAPÍTULO 54

ANÁLISE DO PLANO DE GESTÃO MUNICIPAL INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE RIO BRANCO – AC, SOB A ÓTICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081154

VIANA; TIAGO H. DA COSTA[1]; MONTEIRO; KÉSSIO RAYLEN[2]; SEGOBIA; PEDRO BOMFIM[3]
[1]Universidade Federal do Acre; [2,3] UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: TIAGO.VIANA@SOU.UFAC.BR

RESUMO: Visando analisar o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Rio Branco, sob a ótica técnica voltada à gestão de RCC, se desenvolve o estudo. O poder público tem importante papel no controle e gestão dos resíduos de construção civil (RCC). Considerando a análise do PGMIRS e das Políticas Públicas foi possível ponderar acerca dos aspectos da gestão. Resultando da análise, um indicativo de que o plano possui uma boa fundamentação, em contrapartida à pouca efetividade de atuação segundo os propostos. Sendo, portanto, necessária uma maior atenção e cumprimento às disposições do plano.

PALAVRAS-CHAVES: Análise; Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos; Resíduos de Construção Civil.

ABSTRACT: The government has an important role in the control and management of civil construction waste (CCW). Aiming to analyze the Municipal Plan for Integrated Solid Waste Management in Rio Branco, from a technical perspective aimed at managing CCW, the study is developed. Considering the analysis of the MPISWM and Public Policies, it was possible to consider the aspects of management. Resulting from the analysis, an indication that the plan has a good foundation, in contrast to the low effectiveness of action according to the proposed. Therefore, greater attention and compliance with the provisions of the plan is necessary.

KEYWORDS: Analyze; Municipal Plan for Integrated Solid Waste Management; Civil Construction Waste.

1 | INTRODUÇÃO

A influência do mercado da construção civil, em diversos setores do país, é perceptível. Essa abrangência pode se estender desde de um viés técnico, até econômico e também ambiental. Cardoso (2017)[1] afirma que a construção civil tem impacto perceptível na economia do país, mas também em 50% da geração de resíduos. Indicando que, além dessa abrangência, existe uma correlação de áreas, essencialmente, entre a produção econômica e a geração de resíduos de construção civil (RCC).

Em contrapartida, existem dispositivos legais que visam estabelecer medidas e preconizações ligadas, principalmente, à gestão dos resíduos, e que consequentemente, gerem impactos financeiros, além de impactos de outras ordens, como é o caso dos impactos ambientais e sociais. O Conselho Nacional de Meio Ambiente expõe na

Resolução N.º 307 (2002)[2] as diretrizes pertinentes à gestão dos RCCs. Ela define os conceitos dos mesmos, bem como define os papéis de geradores e transportadores, ainda relacionando com os processos de gerenciamento e beneficiamento. Outros importantes pontos abordados, se relacionam aos processos de reutilização e reciclagem. Para o entendimento desses últimos, aliás, é necessário entender o conceito das classes de resíduos, segundo a classificação dada pela Resolução CONAMA Nº 307.

Entendidas as implicações das classes de resíduos, em diferentes origens, e obviamente, diferentes destinações, é importante dar uma perspectiva na aplicação desses entendimentos. Em uma perspectiva local, Souza et al (2020)[3]. indica que o município de Rio Branco não apresenta gestão eficaz e eficiente para os RCCs e RCDs (resíduos de construção e demolição). O que sugere, portanto, um estudo que indique em ponto (ou pontos), ocorre a falha que impeça essa gestão eficaz e eficiente.

Voltando o olhar ao atendimento dos dispositivos legais para a gestão, porém adotando uma ótica local, é possível se deparar com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS, 2014)[4]. Tal dispositivo que se constituiu de um processo de elaboração participativo e difuso em etapas de reuniões e consultas, é responsável por estender a responsabilidade da destinação dos resíduos aos seus geradores (indústrias, empresas de construção civil, hospitais, portos e aeroportos e outros). Sendo assim, é importante observar as normativas legais dispostas pelo plano, afim de contemplar suas principais etapas de gerenciamento, expressos ao longo do presente estudo.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida através de um estudo do PMGIRS de Rio Branco, Acre, através da análise integral do PMGIRS, verificando seus aspectos gerais, através de uma leitura sistemática, para mapeamento dos aspectos concernetes a resíduos da construção civil.

Foram escolhidos para comparação outros dois planos, a saber: PMGIRS de Manaus (2015)[5] e PGIRS de São Paulo (2012)[6]. Sendo ambos escolhidos por serem um da mesma região geográfica, e outro da uma diferente região geográfica, tendo como metodologia de análise o mesmo mapeamento sistemático mencionado anteriormente.

Em seguida, de posse dos dados e planos em análise, foram consideradas publicações científicas inerentes aos temas correlatos, para o aprofundamento da discussão.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de Falgetano e Pinto (2015)[10] sobre o PMGIRS (2014), à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei Federal 12.305/2010 – indica um bom embasamento, com parâmetros coerentes, que preconizam estratégias para utilização de valor econômico, social e ambiental, para o tratamento dos resíduos.

Dentre os itens gerais abordados no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, os itens específicos para os condicionantes relacionados aos RCCs, são

expressos na Tabela 1.

Item	Preconização
6.5	Resíduos da Construção Civil e Volumosos
7.8	Aterro de resíduos da construção civil e resíduos inertes
11.3	Investimento na Rede de Ecopontos, Área de Triagem e Transbordo e na valorização de resíduos de construção civil
13.10	Coleta seletiva de resíduos da construção civil, volumosos e outros na Rede de Ecopontos

Tabela 1 - Tabela de itens específicos do plano, voltados a RCCs

Fonte: autoral, 2021.

Os itens específicos do plano se relacionam com a caracterização dos RCCs, bem como sua destinação, seus investimentos relativos e suas práticas executivas contempladas para sua realização. Porém, tais itens ainda agregam diversos segmentos de aspectos.

3.1 Diretrizes para o manejo diferenciado de RCC

O estabelecimento das diretrizes e estratégias adotadas pautam-se no levantamento estimativo da composição dos resíduos sólidose da projeção de crescimento da geração de resíduos sólidos, ambos previstos no PMGIRS de Rio Branco. A partir da amplitude de projeto (2014-2034) e considerando a participação de 27% dos RCCs na composição dos resíduos coletados, foram traçadas as diretrizes, implementadas ao longo das estratégias (Tabela 2).

Diretrizes	Estratégias		
Destinação correta	Setorização municipal	Definição de responsabilidades severas	Exigência do PGRS para obras
Valorização do RCCs e RCDs	Aproximação das instalações de destinação	Definição de responsabilidades de comércio	Comprovação de destinação
Ampliação da reciclagem de resíduos classe A	Obrigatoriedade da previsão de Ecopontos e Áreas de Triagem e Transbordo (ATT)	Fomento à reciclagem	Fiscalização

Tabela 2 – Diretrizes e Estratégias adotadas no Plano

Fonte: PMGIRS, 2014[4].

Ademais, das estratégias decorrem uma série de programas e ações visando sua operação tática. Dado esse arcabouço, o plano finalmente expõe suas metas, bem como sua previsão de conclusão por etapas (Tabela 3).

Meta	Estabelecimento de legislação específica	Implemento de Ecopontos e ATTs	Uso de agregados reciclados	Incentivos tributários	Tecnologia na fiscalização	Beneficiamento de resíduos	Pontos de entrega com área > 300m²
Início	2014	2014	2016	2015	2015	2015	2015
Término	2017	2018	2018	2016	2017	2015	2022

Tabela 3 – Metas e previsão de anos de conclusão

Fonte: autoral, 2021.

Dessas metas, em destaque laranja, se relacionam aquelas realizadas por dispositivos legais ou jurídicos correlacionados. Em verde, os que representam metas de caráter técnico.

a) Projetos de Ecopontos e ATT

A dinâmica entre Ecopontos e ATTs se baseia no fato de que os Ecopontos, em maior quantidade e localização em bairros, poderão receber os resíduos domésticos e de pequenos geradores. Ao passo que, de maior porte e com localização mais concentrada, as ATTs receberão resíduos de maior volume, incluído um maior de volume de RCCs, além de serem dotados de unidades de reciclagem. A seguir, a Figura 1 expõe seus projetos.

Figura 15 – Desenho ilustrativo do Ecoponto (área em torno de 700m²).



Figura 16 – Desenho ilustrativo da Área de Triagem e Transbordo (área em torno de 5.000m²).



Figura 1 - Projeto de Ecoponto e ATT.

Fonte: PMGIRS, 2014[4].

b) Ações de ordem pública e legal

Dentre as ações de ordem pública e legal, destacam-se, de ordem relativa à administração pública, a obrigatoriedade de os órgãos realizarem a segregação e correto encaminhamento de RCCs. De ordem legal, verifica-se a proposta de ajuste das legislações municipais, com as diretrizes políticas legais de gerenciamento de resíduos, saneamento e de meio ambiente.

A abrangência de tais ações visa a difusão da responsabilidade de gestão de

resíduos entre todos os agentes públicos ou privados envolvidos. E dentro dos aspectos a serem difusos, destaque para destinação, transporte, e em certos casos, tratamento.

c) Investimentos previstos e agendas propostas

Os investimentos são previstos no plano, segundo seus elementos, componentes das Unidades (Tabela 4).

Descrição	Quantidade (un.)	Custo Unitário (R$/un.)	Custos de Investimento (R$)
Ecoponto	14	R$ 145.841,37	R$ 2.041.779,17
Área de Triagem e Transbordo	2	R$ 124.462,82	R$ 248.925,64
Peneira móvel para segregação de finos	1	R$ 50.000,00	R$ 50.000,00
Realocar e reativar a instalaçao pública de beneficiamento de resíduos da construção	1	R$ 150.000,00	R$ 150.000,00
TOTAL			R$ 2.490.704,81

Tabela 4 – Previsão de investimentos

Fonte: PMGIRS, 2014[4].

Tais investimentos, são guiados conforme a agenda proposta. Em linhas gerais, essa agenda prevê a instalação de 14 Ecopontos e 3 ATTs. Além da implantação de novo manejo para a coleta seletiva de resíduos específicos de RCCs e RCDs. Essa agenda tem como componente o mapa de distribuição de unidades e fluxos (Figura 2).

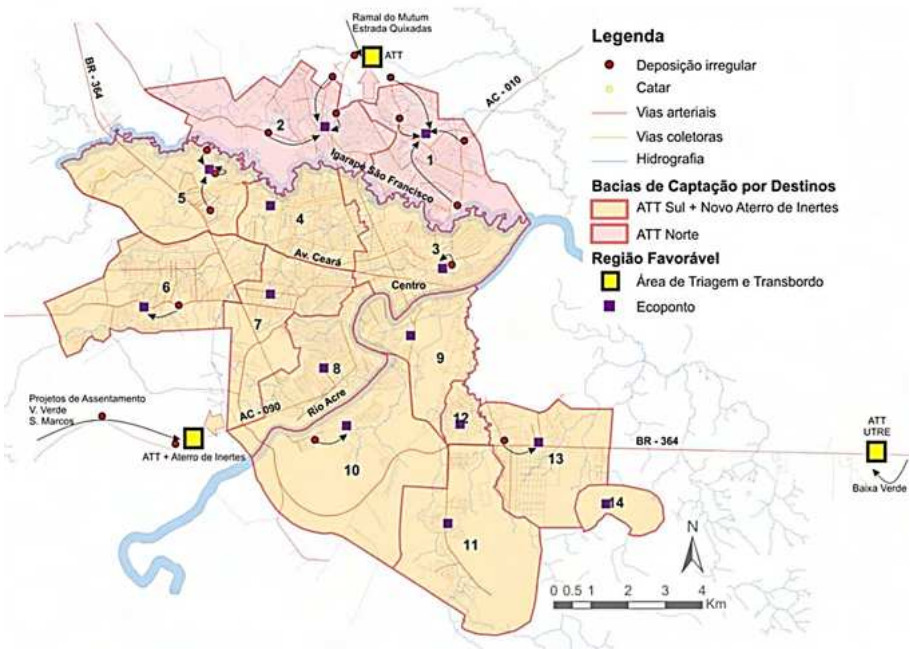


Figura 2 - Mapa com indicação de bacias de captação a serem implantadas

Fonte: PMGIRS, 2014[4].

Conforme indica Melo (2017)[11], o plano vem tendo algumas etapas sendo executadas, como a instalação dos Ecopontos. Tal indicativo relaciona um apontamento de, à época, aplicação das diretrizes em conformidade com o que fora estipulado pelo plano. Porém, os levantamentos realizados pelos autores, indicam fortemente que muitas das metas previstas pelo plano, necessitam efetiva execução. Pontuando algumas das metas que necessitam aplicação prática plena, estão: uso efetivo de agregados reciclados, incentivos tributários, implementação de tecnologias no processo de fiscalização, aplicação de maior abrangência no tratamento de resíduos, e também a finalização dos pontos de entrega de resíduos com vida útil estimada, em áreas superiores a 300 m².

3.2 Análise com outros Planos Municipais de Gestão de Resíduos

À época, Spina (2012)[8] destacou a Unidade de Tratamentos de Resíduos (UTRE) de Rio Branco, como avanço em nível nacional, à antecipação às políticas de fim de lixões. Uma vez que sua implantação se relacionava fortemente com a implementação das políticas nacionais vigentes. Porém, Soares (2012)[9] afirma que o projeto da UTRE necessita maior elaboração em comprometimento com tecnologias de tratamento de resíduos e de seus efeitos subsequentes. Uma vez que embora tenha embasamento, falta a interação de uma gestão efetiva que coalize tais tecnologias empenhadas em beneficiar potencialmente os resíduos.

Em uma análise comparativa com planos de outros estados brasileiros, sendo um também da Região Norte e outro, da Região Sudeste.

Na análise do PMGIRS de Manaus (2015)[5], pôde ser percebido a semelhança dos anos de elaboração, bem como a fundamentação baseada fortemente nas políticas nacionais. Essa influência, resultou em itens similares, porém com maior aprofundamento neste. A exemplo de aprofundamento, foi tomado o item que trata de imposição financeira sobre a geração dos RCCs. Enquanto que no PMGIRS de Rio Branco preconiza somente a existência futura do mesmo, no PMGIRS de Manaus, todo o cálculo do tributo já é realizado, com o subsequente vigor do mesmo.

Esse plano, diferente aos demais analisados, se diferencia por não impor metas e/ou estratégias para a disposição e tratamento dos RCCs. No entanto, ainda discrepante aos demais, ele expõe, em caráter generalista, uma expectativa de panorama da situação futura à aplicação do plano.

Na análise do PMGIRS de São Paulo (2012)[6], embora este possua um ano de elaboração anterior ao plano local, muitas disparidades foram encontradas. De forma geral, se trata de um plano com propostas e diretrizes avançadas, essencialmente maiores desdobramentos nas especificações de preconizações. Tanto, que se nota pela existência de um plano específico para gestão dos RCCs. Similar ao plano local analisado, estão as disposições de estratégias para a gestão dos RCCs, expostos na Tabela 5.

Estratégias	
Ampliação da Rede de Ecopontos	Chamamento Público para fornecedores de agregados reciclados
Ações de informação/educação ambiental	Banco de Agregados Recicláveis
Sistema de fiscalização eletrônica	Criar rede de comunicação digital interativa
Acompanhamento georeferenciado de destinação	Análise do tema fiscal e tributário na cadeia do RCC
Fomento a empreendimentos processadores de resíduos	Promover instituições de pesquisas
Elaborar Guia para Manejo Diferenciado de RCC	Promover eventos sobre projetos e técnicas de construções sustentáveis
Adequação na legislação municipal	Promover encontros com municípios
Elaborar proposta de implantação/manutenção das metas	Elaborar orientação básica para os Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (RCC)

Tabela 5 – Estratégias de ações expostas pelo Plano

Fonte: PMGIRS de São Paulo, 2012[6], adaptado.

Nota-se, pelas estratégias, que os desdobramentos do PMGIRS de São Paulo (2012)[6] são elaborados com maiores especificações, analogamente ao que ocorre em outros itens do plano, como as metas. Isso demonstra o aprofundamento das estratégias, bem como seu maior número, além de sua maior interação com fatores como tecnologia, e de estudos interligados entre áreas.

4 | CONCLUSÕES

É possível observar que de maneira geral, o PMGIRS de Rio Branco possui uma boa fundamentação técnica, baseada em métodos científicos e estudos da área. Tal fundamentação é extremamente positiva por garantir, dentro da amplitude de projeção adotada, dados com confiabilidade para embasamento.

Quando comparado com demais planos, é possível ver que, no entanto, apesar da sua fundamentação, faltam maiores aprofundamentos nas diretrizes abordadas. Essencialmente ao estudo do gerenciamento dos RCCs, seria necessário acrescer às metas propostas, a elaboração de um Plano Municipal de Gestão de RCCs, a exemplo dos planos anteriormente comparados, bem como dispositivos para acompanhamento contínuo das metas que já são propostas, visando estabelecer um histórico capaz de subsidiar as tomadas de decisões em futuros PMGIRS.

Externamente ao plano, resguardas as melhorias sugeridas, para implemento de uma gestão eficaz e eficiente de resíduos, é imprescindível ainda, a execução efetiva das metas propostas no plano, visando os objetivos das estratégias contempladas. Portanto, tal atuação possibilitaria uma efetiva melhoria no gerenciamento dos resíduos, de forma interna ao plano, e também externo a ele, através de seu desempenho prático.

Foram identificadas lacunas no que concerne a mensuração e acompanhamento das metas já propostas, bem como ferramentas e dispositivos que permitam a real implementação do PMGIRS de Rio Branco, sendo fundamental para o desenvolvimento

da gestão de resíduos da construção civil, como observador nos PMGIRS de Manaus e São Paulo, que são planos mais maduros e desenvolvidos, e que já tem informações para subsidiar de forma mais concreta a elaboração do PMGIRS.

REFERÊNCIAS

1. CARDOSO, L. M. **Tudo sobre os resíduos sólidos da construção civil**. Plataforma Sienge. 2017. Disponível em: https://www.sienge.com.br/blog/residuos-solidos-da-construcao-civil/. Acesso em: 05 de maio de 2021.

2. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução N.º 307**, de 5 de Julho de 2002. Brasília, Distrito Federal. 2002.

3. SOUZA, F. S.; OSTE, B. P.; LIMA, E. F. L.; PEIXOTO, R. A. F. Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição em Rio Branco, Acre. In: South American Journal, of Basic Technical and Tecnological. V. 7, N. 2. Rio Branco, Acre. 2020.

4. PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO BRANCO. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Rio Branco, Acre. 2020.

5. PREFEITURA MUNICIPAL DE MANAUS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Manaus, Amazonas. 2015.

6. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. São Paulo, São Paulo. 2012.

7. SINCATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO – SINDUSCON-SP. **Resíduos da Construção Civil: Gestão pelos Municípios**. São Paulo, São Paulo. 2012.

8. SPINA, R. **Unidade de resíduos sólidos de Rio Branco é modelo para o país**. Teoria e Debate. Especial Cidades. São Paulo. 2012.

9. SOARES, A. C. **Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos Recicláveis na Unidade de Tratamento de Resíduos Sólidos (UTRE Rio Branco/AC)**. Monografia (Bacharelado). Universidade de Brasília. 2012.

10. FALGETANO, P. P.; PINTO, T. P. **Processo participativo na construção de uma política municipal de resíduos sólidos: valorização dos resíduos e redução de custos**. Artigo (Pós-Graduação). Centro Oswaldo Cruz. 2015.

11. MELO, Q. **Rio Branco inaugura primeiro ecoponto para descarte de materiais reaproveitáveis**. Site G1. Rio Branco, Acre. 2017. Disponível em: https://g1.globo.com/ac/acre/noticia/rio-branco-inaugura-primeiro-ecoponto-para-descarte-de-materiais-reaproveitaveis.ghtml. Acesso em: 03 de maio de 2021.

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO AGROINDUSTRIAL COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM FIBROCIMENTOS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081155

BASSAN DE MORAES; MARIA JÚLIA[1]; SOARES TEIXEIRA; RONALDO[1]; PROENÇA DE ANDRADE; MAXIMILIANO [1]; MITSUUCHI TASHIMA; MAURO[2]; ROSSIGNOLO; JOÃO ADRIANO[1]
[1] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS; [2] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MAJU.BAMORAES@USP.BR

RESUMO: Considerando a busca pela sustentabilidade e a melhoria técnica, esse trabalho tem como objetivo o estudo da influência da cinza de folha de bambu (CFB) como substituição parcial do cimento Portland em fibrocimentos confeccionados pelo processo de extrusão. Para isso, foram confeccionados fibrocimentos com diferentes dosagens, as quais foram submetidas a ensaios físicos e mecânicos. O aumento da relação água/aglomerante associado a incorporação de fibras gerou poros mais conectados nos compósitos, tornando-os mais suscetíveis a ruptura e ao aparecimento de fissuras. Porém, a alta reatividade da CFB melhorou o desempenho mecânico da matriz e o comportamento pós-fissuração dos compósitos.

PALAVRAS-CHAVES: Cinza de folha de bambu, sustentabilidade, extrusão, fibrocimento, caracterização físico-mecânica.

ABSTRACT: Considering the search for sustainability and technical improvement, this work aims to study the influence of bamboo leaf ash (BLA) as partial replacement for Portland cement in fiber cement made by extrusion process. The fibercement specimens were prepared with different dosages, which were subjected to physical and mechanical tests. The increase in the water/binder ratio associated with the incorporation of fibers generated pores more connected in the composites, making them more susceptible to rupture and the appearance of cracks. However, the BLA high reactivity improved the mechanical performance of the matrix and the post-cracking behavior of the composites.

KEYWORDS: Bamboo leaf-ash, sustainability, extrusion, fiber-cement, physical-mechanical characterization.

1 | INTRODUÇÃO

A ideia de sustentabilidade nas indústrias pode ser entendida como o equilíbrio entre necessidades humanas e o uso de recursos naturais. Em meio a esse cenário, a indústria cimentícia tem um papel ambíguo, pois ao mesmo tempo que atua na construção e desenvolvimento de infraestrutura, também é responsável por altos consumos de energia e matérias-primas não-renováveis como a argila e o calcário, além da emissão de gases causadores de efeito estufa, advindos da queima de combustíveis fósseis e reações químicas envolvidas no processo, como a calcinação(1).

Com o objetivo de amenizar tais impactos ambientais e de se obter novas

tecnologias, o setor da construção civil já vem utilizando subprodutos da indústria como material pozolânico para substituição parcial do cimento. Porém, as pozolanas derivadas da agroindústria, apesar de serem geradas em maior quantidade em comparação a de outras indústrias, principalmente em países emergentes, de serem amplamente pesquisadas e apresentarem resultados satisfatórios, ainda não possuem aplicação comercial expressiva [2].

Já o processo de produção de fibrocimento por extrusão tende a trazer benefícios técnicos aos compósitos, além da ser uma alternativa economicamente viável por ter um menor custo de implantação em relação a outros métodos de produção de fibrocimento [3].

Dessa forma, o presente trabalho avaliou a influência de um material pozolânico, com campo de pesquisa pouco aprofundado, a cinza de folha de bambu (CFB), subproduto da agroindústria, como substituição parcial ao cimento Portland, aliada às fibras de polipropileno (PP) na produção de fibrocimento por extrusão (produção de peças em fluxo contínuo forçado através de um molde predefinido).

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A pesquisa utilizou folhas de bambu (*Bambusa vulgaris*) coletadas em Ilha Solteira – São Paulo. A CFB foi produzida pelo processo de autocombustão, no qual a temperatura de queima não é controlada, apenas monitorada através de sensores de temperatura (termopares). Após sua calcinação, a cinza foi peneirada (peneira ASTM #50) por sete minutos para remover eventuais impurezas e folhas não queimadas. Posteriormente, a cinza foi moída por 50 minutos para diminuir seu diâmetro médio e aumentar sua superfície específica em um moinho de bolas com capacidade de 15 kg. A caracterização físico-química, estudo de reatividade desse lote de CFB, do qual pertence a cinza utilizada nesse estudo, e estudo da cinza em argamassas pode ser visualizado no artigo publicado por Moraes et al. [2]

Foram escolhidos materiais semelhantes aos utilizados nas indústrias para a produção dos fibrocimentos dessa pesquisa, exceto pela CFB. O cimento utilizado foi o CPV- ARI, o qual possui um teor de clínquer maior que 95%, (sem adição mineral) que não interferirá na avaliação da atividade pozolânica da CFB. Utilizou-se calcário moído como filler. Foram utilizadas fibras sintéticas de Polipropileno (PP) com 9 mm de comprimento como reforço do fibrocimento, uma vez que possuem resistência à alcalinidade. As fibras sintéticas foram fornecidas pela empresa Saint Gobain S/A. Foram empregadas polpas celulósicas branqueadas Kraft, fornecidas pela empresa Suzano Papel e Celulose, como reforço secundário e controle de fissura. As polpas são derivadas da espécie híbrida *Eucalyptus urograndis* e passaram por um processo de desintegração[4] para serem aplicadas nos fibrocimentos. Para que a matriz cimentícia apresentasse o comportamento reológico desejado, foram utilizados o aditivo retentor de água Hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), fornecido pela empresa Aditex S.A. e o superplastificante poliéter carboxilato, conhecido comercialmente como ADVA 175, fornecido pela empresa Grace Brasil Ltda.

2.2 Dosagem

As dosagens das matrizes cimentícias foram baseadas no trabalho desenvolvido por Teixeira et al.[5], similar as dosagens utilizadas pela indústria de fibrocimento, apresentada na Tabela 1.

Matérias-primas	Nomenclatura ou formulação	Cimento Portland	Calcário Moído	CFB	Polpa Celulósica	Fibra PP	Relação Água/ Aglomerantes (cimento Portland e CFB)
(CP)	69,95	27,08	-	2,98	-	0,25	
Cimento Portland 1% PP	(CP1)	69,25	26,81	-	2,95	1,00	0,28
CFB 10% 1% PP	(CP1-CFB 10)	62,33	26,81	6,93*	2,95	1,00	0,31
CFB 15% 1% PP	(CP1-CFB15)	58,86	26,81	10,39**	2,95	1,00	0,33

* 10% em relação a massa de cimento ** 15% em relação a massa de cimento

Tabela 1 - Dosagens utilizadas nas dosagens (% em massa)

Fonte: Própria autoria

Ambos os aditivos retentor de água e superplastificante foram adicionados com teores de 1% em relação aos aglomerantes (cimento Portland e cinza).

2.3 Extrusão

Os fibrocimentos foram extrudados em uma extrusora com rosca helicoidal (tipo Auger), com diâmetro de 75 mm e comprimento de 100 mm, da marca Gelenski, modelo MVIG-05, com uma boquilha de 200 mm de comprimento sendo a velocidade adotada de 4 mm/s. O processo de cura foi baseado no trabalho de Teixeira[3], os corpos-de-prova produzidos foram selados em sacos plásticos por cerca de 48 horas. Após esse período, foram transferidos ainda selados para o banho térmico a 60ºC, onde permaneceram por mais cinco dias. Após o processo de cura, foram cortados por uma serra apropriada, adquirindo as medidas de 160 mm x 50 mm x 15 mm e submetidos aos ensaios físicos e mecânicos.

2.4 Ensaios Físicos

Os valores de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) foram determinados através da norma ASTM C948 – 81[6]. Foram utilizados 20 corpos-de-prova de cada dosagem para esse ensaio.

2.5 Ensaios Mecânicos

O ensaio realizado foi o de tração na flexão com quatro pontos com base no

procedimento experimental de acordo com RILEM, 1984[7] e Savastano Junior[8]. Foram utilizados 20 corpos-de-prova para esse ensaio. O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC DL-30000, sendo o vão inferior de 135 mm e o vão superior de 45 mm, com célula de carga de 5 kN e com velocidade de carregamento de 5 mm/min. O ensaio foi realizado com o auxílio de um deflectômetro para a medição de pequenas deformações, sendo sua precisão de 0,001 mm. Através dos valores obtidos foi possível determinar o módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos ensaios físicos

A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos de absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) para as dosagens estudadas.

Dosagem/Ensaio	Absorção de água (%)	Densidade Aparente (g/cm^3)	Porosidade Aparente (%)
CP	16,20 ± 0,35	2,038 ± 0,109	33,00 ± 1,60
CP1	17,42 ± 0,66	1,795 ± 0,082	31,25 ± 1,82
CP1-CFB 10	18,15 ± 0,59	1,678 ± 0,009	30,44 ± 0,88
CP1-CFB15	18,85 ± 0,51	1,638 ± 0,008	30,87 ± 0,73

Tabela 2 - Resultados obtidos de AA, DA e PA para as dosagens CP, CP1, CP1-CFB10 e CP1-CFB15
Fonte: Própria autoria

As dosagens com a CFB apresentaram menor porosidade aparente, o que pode ser justificado devido ao efeito físico (filler) e químico (formação de géis amorfos) da pozolana na matriz.

Porém, apesar das dosagens que contém fibra apresentarem menor porosidade aparente, também apresentaram um aumento na absorção de água, o que tem relação com a conectividade dos poros. Tal fato pode ser explicado pela aumento da relação água/aglomerante dessas dosagens, o que ocasionou poros mais conectados. Para a dosagem controle (CP), foi utilizada a menor relação a/a (0,25), seguida pela CP1 (0,28), CP1-CFB10 (0,31) e CP1-CFB15 (0,33).

Um estudo feito por Teixeira et al.[5] com fibrocimentos extrudados com a incorporação de fibra PP mostrou, por meio de análises de microtomografia de raios - X, que esses compósitos apresentavam maior quantidade de poros de capilaridade com maiores dimensões e macro poros do que os compósitos apenas com a polpa celulósica, devido à dificuldade no empacotamento das partículas e fibras na microestrutura, assim como a baixa densidade da zona de transição fibra-matriz.

3.2 Análise dos ensaios mecânicos

A Tabela 3 apresenta os valores médios obtidos de módulo de ruptura (MOR),

limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e energia específica (EE) para as dosagens estudadas.

Dosagem/Ensaio	MOR (MPa)	LOP (MPa)	MOE (GPa)	EE (kJ/m²)
CP	12,07 ± 0,62	12,07 ± 0,62	8,94 ± 0,83	0,38 ± 0,04
CP 1	10,38 ± 0,58	8,66 ± 0,94	8,14 ± 0,95	2,85 ± 0,51
CP1-CFB 10	14,07 ± 0,53	8,94 ± 0,80	7,3 ± 0,79	6,36 ± 0,78
CP1-CFB 15	13,53 ± 0,41	9,14 ± 0,74	6,71 ± 0,91	6,35 ± 0,78

Tabela 3 - Resultados obtidos de MOR, LOP, MOE e EE para as dosagens CP, CP1, CP1-CFB10 e CP1-CFB15
Fonte: Própria autoria

A partir da Tabela 3, é possível observar que o módulo de ruptura, ou seja, a resistência à tração na flexão, da dosagem CP1 é menor do que da dosagem CP, o que indica que a incorporação de fibras diminuiu o desempenho mecânico do compósito. Resultado semelhante foi observado por Teixeira et al.[9], o qual justificou tal queda no desempenho devido ao aumento de porosidade que a fibra causa devido a deficiência na sua dispersão na matriz o que, consequentemente, gera uma falha na transferência de tensão entre a fibra e a matriz. De fato, a partir dos ensaios físicos foi possível observar poros mais conectados nas dosagens com fibras PP. A presença desse poros com maiores dimensões dificulta a distribuição de tensões matriz-fibra no pós-fissuração, como a matriz cimentícia se trata de um material frágil, o comprometimento da distribuição de tensões causa um decréscimo no comportamento mecânico e um menor módulo de ruptura. Além disso, poros conectados por si só são defeitos que deixam a matriz mais suscetível a ruptura.

Porém, as dosagens com CFB apresentaram uma melhora do MOR em relação ao controle, o que mostra que a alta reatividade da pozolana[2] não apenas mitigou os efeitos negativos da fibra na matriz, como trouxe um aumento de 21,79 e 12,10% em relação ao controle para as dosagens CP1-CFB10 e CP1-CFB15, respetivamente.

A pozolana melhora o desempenho mecânico das matrizes através de sua ação química e física. Quimicamente, as sílicas e aluminas amorfas presentes na pozolana reagem com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, aumentando a resistência da matriz. Fisicamente, a pozolana age através do efeito filler, no qual as partículas pequenas da pozolana preenchem os espaços vazios da matriz, diminuindo sua porosidade como visto nos ensaios físicos, tornando o material mais coeso, dificultando sua ruptura, e através do efeito de nucleação, na qual permite-se uma maior reação da partícula de cimento, aumentando os produtos responsáveis pela resistência mecânica[2].

Essa melhoria é ainda mais expressiva quando se calcula o ganho de resistência proposto por Payá, Monzó e Borrachero[10], parâmetro que compara a resistência de uma dosagem controle, com uma correção baseada na percentagem de substituição. Uma vez que ao se retirar cimento Portland da mistura, a tendência é que a resistência diminua de forma proporcional, como seria o caso de uma substituição por material inerte e de granulometria semelhante, por exemplo. Porém, como a CFB é altamente

reativa[2] ela gerou um ganho de resistência de 29,52% para a dosagem com 10% de substituição e de 31,88% para a dosagem com 15% de substituição, em relação a dosagem controle. Mas em relação a dosagem CP 1, o ganho de resistência foi de 50,61% para a dosagem CP1-CFB10 e de 53,35% para a CP1-CFB15.

O limite de proporcionalidade indica o final do regime de comportamento elástico e começo do comportamento plástico, no ensaio é caracterizado pelo aparecimento da primeira fissura[11]. A dosagem sem incorporação da fibra PP apresentou LOP com o mesmo valor de MOR, tal comportamento é típico de materiais frágeis.

O decréscimo do LOP nas dosagens com fibra pode estar associado ao aumento do teor de água, uma vez que, como visto nos ensaios físicos, essas dosagens apresentaram poros mais conectados, mais suscetíveis ao aparecimento da primeira fissura. Porém, também é possível se observar com os valores do LOP, a influência positiva da CFB no desempenho mecânico do compósito, apesar de apresentar mais poros conectados, a maior resistência da matriz causou um retardo na fissuração. As dosagens com incorporação de fibras apresentaram MOR > LOP, o que caracteriza resistência pós fissuração.

Um estudo feito por Xu, Deng e Chi[12], utilizando a técnica da nanoidentação, mostrou que o aumento da relação água/cimento ocasionou uma queda nos valores do módulo de elasticidade em uma matriz cimento/fibra PP. Tal correlação também pode ser observada nesse estudo, uma vez que os valores de MOE decaíram conforme o aumento do teor de água nas dosagens. O aumento do teor de água causou um aumento nos poros conectados como visto nos ensaios físicos, os quais tornam a matriz mais suscetível a sofrer deformações no regime elástico. Ademais, a incorporação de fibras, uma vez que a mesma apresenta baixo módulo de elasticidade, potencializa a maior deformação da matriz e consequentemente, a diminuição do MOE.

A energia específica representa a tenacidade do material e seu aumento em fibrocimentos ocorre devido a ação das fibras no pós-fissuração, as quais criam pontes através das fissuras propagadas na matriz, evitando-se uma ruptura frágil[13]. A adição da CFB aumentou significativamente a energia específica, o que mostra que a pozolana interagiu muito bem com a fibra sintética, melhorando a propagação dos esforços e, por consequência, seu comportamento mecânico pós-fissuração.

O alto valor da energia específica para os compósitos com CFB também pode ser devido a incorporação de material pozolânico altamente reativo na matriz[2], reagindo com o hidróxido de cálcio, o que pode ter contribuído para a diminuição alcalinidade do compósito e para a preservação da polpa celulósica[14]. Dessa forma, a partir da utilização da CFB obteve-se uma otimização do comportamento mecânico da matriz, aliado a uma melhor condição do reforço secundário, o que permitiu um bom comportamento fibra-matriz e por consequência, um ótimo desempenho pós-fissuração, quando comparado com as dosagens sem fibra e sem CFB.

4 | CONCLUSÕES

Os ensaios físicos mostraram que a incorporação da CFB nas dosagens causa uma diminuição da porosidade aparente devido ao efeito físico-químico da pozolana na matriz. Porém, o aumento da relação água/aglomerante associado com a incorporação

de fibras gerou poros mais conectados nas dosagens CP1, CP1-CFB10 e CP1-CFB15. Já os ensaios mecânicos mostraram que esses poros deixam a matriz mais suscetível a ruptura, ao aparecimento de fissuras e a deformações elásticas.

A alta reatividade da CFB melhorou o desempenho mecânico da matriz e mitigou os efeitos negativos da incorporação de fibras, além de possibilitar um melhor trabalho matriz e reforço no pós-fissuração, quando comparado com os compósitos sem a incorporação da pozolana.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2019 / 11949-8.

REFERÊNCIAS

1. OLIVEIRA, M.G.F. Roadmap Tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: 2019

2. MORAES, M. J. B. *et al*. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 208, p. 369-380, 2019.

3. TEIXEIRA, R. S. **Efeito das fibras de curauá e de polipropileno no desemprenho de compósitos cimentícios produzidos por extrusão**, 2015. 147 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Engenharia de São Carlos (USP), 2015.

4. FILOMENO, R, H. **Avaliação da influência da umidade relativa da atmosfera de cura na carbonatação de materiais de fibrocimento**. 2018. 111f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

5. TEIXEIRA, R. S. et al. Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (Ananas erectifolius) or polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 97–110, 2019.

6. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C 948-81: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete.** West Conshohocken, USA, 2016.

7. REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DES RECHECHES SUS LES MATERIAUX ET LES CONSTRUCTIONS – RILEM. RILEM 49-TRF: testing methods for fibre reinforced cment-based composites. **Matériaux at Constructions**, v. 17, n. 102, p. 441–456, 1984.

8. SAVASTANO JR., H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 144 f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica (USP), 2000.

9. TEIXEIRA, R. S. et al. Impact of content and length of curauá fibers on mechanical behavior of extruded cementitious composites: Analysis of variance. **Cement & Concrete Composites**, v. 102, p. 134–144, 2019.

10. PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1, p. 57–61, 2001.

11. BENTUR, A.; MINDESS, S. Test methods. In: BENTUR, A.; MINDESS, S. (Ed.). **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007. p. 186–234.

12. XU, L.; DENG, F.; CHI, Y. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 619–638, 2017.

13. BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre–cement interactions: Stress transfer, bond and pull-out. In: BENTUR, A.; MINDESS, S. (Ed.). **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London and New York: Taylor & Francis, 2007c. p. 31– 104.

14. MEJIA-BALLESTEROS, J. E. et al. Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. **Cement & Concrete Composites**, v. 98, p. 49–60, 2019.

PROJETO SARGOOD: VALORIZAÇÃO DO *SARGASSUM* NA CONSTRUÇÃO CIVIL

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081156

ROSSIGNOLO, JOÃO ADRIANO[1]; BUENO, CRISTIANE[2]; DURAN, AFONSO JOSE FELICIO PERES[1]; LYRA, GABRIELA PITOLLI[1]; ASSUNÇÃO, CAMILA CASSOLA[1]; GAVIOLI, LETICIA MISSIATO[1]; MORAES, MARIA JULIA BASSAN[1]; NASCIMENTO, JOÃO LUCAS SILVA[1]

[1]FACULDADE DE ZOOTECNICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (FZEA/USP); [2]UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÂO CARLOS (UFSCAR).

E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ROSSIGNOLO@USP.BR

RESUMO: Com o aumento do mar de *Sargassum* no oceano atlântico, tem sido frequente os deslocamentos de grandes massas dessas algas, ocasionando encalhes nas costas do Golfo do México, Caribe, África e Brasil, causando sérios problemas ambientais e econômicos. Uma forma de amenizar esses impactos é estudar alternativas para a valorização do *Sargassum* que chega até acosta. Assim, este artigo aborda a valorização do *Sargassum* em materiais de construção considerando que essa macroalga apresenta algumas aplicações potenciais, tais como fibras de reforço em compósitos e da cinza, obtida na queima para geração de energia, como adição mineral em compósitos cimentícios.

PALAVRAS-CHAVES: *Sargassum*; valorização; resíduos; materiais de construção.

ABSTRACT: With the increase in the *Sargassum* Sea in the Atlantic Ocean, displacements of large masses of algae have been frequent, causing strandings on the coasts of the Gulf of Mexico, the Caribbean, Africa and Brazil, causing serious environmental problems and reducing them. One way to mitigate these impacts is to study alternatives for the valorization of *Sargassum* that reaches the coast. Thus, the objective of this article is the valorization of *Sargassum* in construction materials considering that this macroalgae has some potential applications, such as reinforcement fibers in composites and ash, obtained from burning for energy generation, as mineral addition in cementitious composites.

KEYWORDS: *Sargassum*; valorization; waste; construction materials.

1 | INTRODUÇÃO

O *Sargassum* (*Sargassum C. Agardh*), uma alga marinha pertencente a classe *Phaeophyceae* (algas marrons), é comumente encontrado em regiões de clima temperado e subtropical, com 536 espécies reconhecidas e distribuídas em quase todas as bacias oceânicas (1,2). Especificamente na região noroeste do oceano atlântico, existe uma elevada concentração de *Sargassum* pelágico, que permanece flutuando livremente, não apresentando um órgão fixador no fundo do mar. Essa concentração de algas recebe o nome de Mar de *Sargassum*, devido às placas flutuantes da alga, já relatadas no século XV por Cristóvão Colombo (3).

O Mar de *Sargassum* é composto, principalmente, pelas massas flutuantes de

duas espécies pelágicas, *S. fluitans* (tipo III) *e S. natans* (tipos I e VIII), apresentadas na Figura 1, com expressiva importância no ecossistema, pois é produtor primário da cadeia alimentar aquática, servindo de substrato, abrigo e alimento para diversas espécies marinhas, como peixes, camarões, caranguejos, pássaros e tartarugas, atuando como foco de biodiversidade e produtividade marinha (4)floating Sargassum (Fucales, Phaeophyceae.



Figura 1 – Imagem comparativa entre o *S. natans* (esquerda) e o *S.fluitans* (direita) (Fonte: https://gcrl.usm.edu/*Sargassum*/*Sargassum*.identification.guide.php. Acesso em: 20 maio 2021)

O monitoramento por imagens de satélite tem indicado o aumento do Mar de *Sargassum*, especialmente a partir de 2011, com o surgimento recorrente de um "Great Atlantic *Sargassum* Belt (GASB)", estendendo-se da África Ocidental ao Golfo do México, passando pelo norte do Brasil (2,3,5–11). Em 2018 foi estimado que o GASB tinha cerca de 8.850 quilômetros, com mais de 20 milhões de toneladas de biomassa de *Sargassum* (12).

Com o aumento do Mar de *Sargassum*, desde 2011 tem sido frequentes os deslocamentos de grandes massas de algas, ocasionando encalhes dessa biomassa nas costas do Golfo do México, Caribe, Oeste da África (entre Serra Leoa e Gana) e norte e nordeste do Brasil, causando sérios problemas ambientais, ecológicos e econômicos (4,13)Caribbean, and Gulf of Mexico, using image data from the OLCI (Ocean and Land Colour Instrument.

Esses deslocamentos de *Sargassum* para as costas pode afetar diretamente a população da região atingida, uma vez que a decomposição da biomassa tem efeitos nocivos na saúde da população local (pela geração de gases tóxicos), nas atividades turísticas, na pesca local, bem como demanda elevados gastos com sua retirada das praias. Além disso, o *Sargassum* pelágico carrega consigo espécies associadas que são exóticas para diferentes ecossistemas, o que pode comprometer o equilíbrio ecológico local costeiro (3,14). A principal hipótese para essas ocorrências está relacionada à mudança de regime nas condições climáticas, como aquecimento das temperaturas, e no

enriquecimento de nutrientes dos oceanos. Essas alterações podem estar favorecendo o aumento populacional das espécies de *Sargassum* e provocando mudanças nos padrões das correntes de superfície marítima, deslocando essas algas à deriva para as áreas costeiras do Golfo do México, Caribe, Oeste da África e norte do Brasil (4,13,15). No Brasil, desde 2011 há registros de ocorrência de Sargassum nas praias do norte e nordeste (5), com destaque para a ocorrida entre os anos de 2014 e 2015, que chegou até a ilha de Fernando de Noranha (4)floating Sargassum (Fucales, Phaeophyceae.

Uma forma de amenizar esses impactos é estudar alternativas para a valorização da biomassa de *Sargassum* que chega até a costa (16). Nesse sentido, vários estudos estão sendo desenvolvidos sobre a aplicação da biomassa de *Sargassum* nas áreas de alimentos, agricultura, saúde, biocombustíveis e biorremediação (6,16,17). No entanto, são poucos os trabalhos sobre a aplicação dessa biomassa na construção (18), apesar da composição do *Sargassum*, basicamente de celulose e polissacarídeos (6,12), indicar que esse material pode apresentar algumas aplicações potenciais nesse setor, tais como fibras (19,20), que podem ser usadas como reforço para compósitos. Além disso, os subprodutos do processamento do *Sargassum*, como a queima para geração de energia (6,21), podem gerar cinzas com potencial de utilização como adição mineral em compósitos cimentícios.

Nesse sentido, ampliando a visão sobre a valorização da biomassa de *Sargassum* que tem chegado a costa, o objetivo deste artigo é realizar uma avaliação sobre a valorização do *Sargassum,* considerando sua aplicação em materiais de construção.

2 | COMPOSIÇÃO E POTENCIAL DO USO DO *SARGASSUM* NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O processo de compreensão dos desafios e potenciais aplicações do *Sargassum* na construção civil requer ume etapa de identificação dos componentes presentes nessa alga. No entanto, mesmo havendo vários estudos que analisaram a composição do *Sargassum*, poucos referem-se, especialmente, às espécies *fluitans* e *natans*, e existem alguns desafios nessa análise, uma vez que a localização geográfica da coleta e a época do ano podem influenciar significativamente nos resultados. Considerando esses desafios, a seguir serão apresentados os resultados da composição aproximada de *S. fluitans* e *S. natans*.

O teor de umidade do *Sargassum*, especificamente das espécies *natans* e *fluitans*, varia entre 80 e 95% da composição total antes da secagem (Tabela 1)(22). Essa informação é importante especialmente para aplicações que podem necessitar da secagem da matéria-prima antes de seu uso, como por exemplo o uso como fibras de reforço em compótos.

Amostras	Teor de Umidade*	Cinzas	Fibras	Alginato
Sn I	87,41 ± 0,23	35,71 ± 1,27	37,00 ± 0,42	11,13 ± 2,02
Sn VIII	86,45 ± 0,10	34,26 ± 0,59	37,41 ± 0,43	12,18 ± 2,10
Sf	86,32 ± 0,02	33,63 ± 4,14	31,15 ± 0,35	9,36 ± 2,51

Tabela 1. Média dos valores, em porcentagem (%), dos teores de umidade, cinzas, fibras e alginato das diferentes morfologias de *Sargassum* pelágico *antes da secagem).

O conteúdo de cinzas nas algas pelágicas pode variar muito, com valores relatados variando de 18 a 55% do peso seco (23), No caso de *S. fluitans* e *S. natans*, Milledge (20) relataram que o conteúdo de cinzas variou entre 34 e 47% do peso seco (Tabela 1). O elevado teor de cinzas do *Sargassum* indica um potencial de utilização desse material, que pode ser um subproduto da queima para geração de energia (6,21), em compósitos cimentícios, como adição mineral, e também em compósitos com aglomerantes alcáli-ativados, considerando a composição química dessas cinzas (Tabela 2).

A Tabela 1 apresenta também um resumo dos teores de fibras e alginato do *Sargassum* pelágico (12,20) as diferentes morfologias do *Sargassum* pelágico apresentam um rico conteúdo de fibras, superior a 31%, em relação ao peso seco. A composição lignocelulósica das espécies pelágicas de *Sargassum* ainda necessita de estudos específicos. Porém, em pesquisa realizada por Alzate-Gaviria (24) foi caracterizado o teor lignocelulósico de algas coletadas em Puerto Morelos, Quinta Roo, no México, foram obtidos valores de tecidos semelhantes a lignina variando entre 25,40% e 29,5%, em relação à massa seca e o teor médio de holocelulose (celulose e hemicelulose) dessa pesquisa foi de 45.39% para o *S. natans* e 34.43% para o *S.fluitans*, ambos em massa seca (24,25). O elevado teor de fibras observado pode habilitar esse materiais para possiveis aplicações como reforço em compósitos, assim como o alginato, que apresenta caracteristicas adesivas, pode apresentar aplicações na área de ligantes inorgânicos.

Especificamente sobre a caracterização da concentração dos elementos químicos nas espécies *S. natans I*, *S. natans VIII* e *S. Fluitans*, se destaca o estudo por Davis (26), que analisou a composição de amostras de *Sargassum* coletadas na região de Porto Real, Jamaica. Os resultados desse estudo, apresentado na Tabela 2, indicam que essas algas marinhas apresentam uma grande quantidade de minerais, pois possuem polissacarídeos como o alginato, que lhes permite capturar certos compostos de seu ambiente circundante. Nos resultados observou-se que os elementos químicos preponderantes foram Ca, K, Na, S, Cl e Mg. A presença da elevada quantidade de cálcio, caso resulte na formação de uma cinza rica em CaO reativo, pode indicar um comportamento hidráulico, semelhante a escória de alto forno utilizada amplamente na indústria cimentícia e como o precursor mais utilizados em sistemas com alto teor de cálcio de aglomerantes ativados alcalinamente (27).

Elementos	Sn I	Sn VIII	Sf
Na	11441,00	14436,18	11310,71
Mg	8456,26	6193,47	8684,03
Al	335,69	187,70	427,57
K	28701,30	32865,84	30503,78
Ca	56138,23	36435,64	57726,79
Mn	39,62	13,03	22,92
Fe	634,79	237,07	832,97
Zn	14,71	6,35	7,2
As	64,91	60,30	58,32
Ba	22,17	19,21	23,21

Tabela 2. Concentração de elementos químicos em µg/g de peso seco da biomassa das morfologias do *S. natans I* (Sn I), *S.natans VIII* (Sn VIII) e *S. fluitans* (Sf).

3 | APLICAÇÕES DO *SARGASSUM*

Uma forma de amenizar os impactos do *Sargassum*, considerando sua composição quimica, é o estudo de alternativas para a sua valorização na construção civil. Nesse contexto, em busca de trabalhos nesse tema foram encontrados poucos relatos sobre pesquisas do uso do *Sargassum*, concentrados em pavimentação asfáltica e na produção de blocos de terra crua (adobe).

Salazar-Cruz (28) avaliou a viabilidade de utilizar o *Sargassum*, coletado na cidade Madero, México, como agente modificador do aglomerante asfáltico. Os autores identificaram a possibilidade do uso do *Sargassum* como agente modificador de betume, com possibilidade de atuação similar aos elastômeros sintéticos, como o SBS (estireno-butadieno-estireno), sendo um material alternativo para melhorar o desempenho de estradas pavimentadas, reduzindo as falhas ao longo de sua vida, como sulcos, deformações excessivas e rachaduras térmicas e por fadiga. O *Sargassum* foi processado em partículas em torno de 850 µm de comprimento e adicionado em diferentes proporções (0,5 e 4% em massa de betume) por meio de procedimento de mistura termomecânico (180°C e 1500 rpm). Os resultados da pesquisa demonstraram que o ponto de amolecimento, viscosidade dinâmica, índice de penetração e resistência a deformações permanentes apresentaram melhorias nas amostras onde utilizou-se *Sargassum* em proporções até 2,5%.

Também foram encontradas algumas pesquisas que avaliam o uso de *Sargassum* na confecção de blocos de terra crua (adobe) para construção, com o intuito de minimizar o impacto dos encalhes de algas nas praias (29). As pesquisas abordam a aplicação das macroalgas na confecção dos blocos na forma de adesivo (estabilizante de solo) e de fibras (reforço). O alginato presente nas algas, que apresenta características aglomerantes, pode contribuir com a estabilização do solo na confecção dos blocos (30).

Foram identificados dois trabalhos utilizando alginato extraído de algas da região da Grã-Bretanha, com melhoria significativa no desempenho mecânico dos blocos

(31,32). O trabalho desenvolvido por Galán-Marín (31) avaliou blocos de adobe com adição de 0,5% de alginato em relação ao peso de solo. Os resultados indicaram que a adição de alginato aumentou a resistência à compressão em 70%. Nesse mesmo sentido, no trabalho desenvolvido por Dove (32) foi observado que o uso de 0,5% de alginato (em relação ao peso de solo) elevou os valores de resistência à compressão dos blocos em cerca de 100% e os valores de resistência à flexão em cerca de 190%.

Com relação ao uso do *Sargassum* como reforço de adobe, foi identificado um relato dessa aplicação no texto de Desrochers (29), que elaboraram um "*Sargassum* uses guide" sobre as aplicações das algas que estão chegando na região do Caribe. Nesse trabalho há menção a uma iniciativa de produção de adobe usando *Sargassum* in natura (S*. natans* e *S. fluitans*), coletado na costa de Quintana Roo, no México. Os blocos foram produzidos com cerca de 40% de *Sargassum* em relação ao peso de solo, e os valores de resistência à compressão variaram entre 7,5MPa e 11MPa (considerados elevados para esse tipo de bloco não queimado).

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo teve como objetivo identificar algumas das potenciais aplicações e desafios relacionados ao uso de biomassa de *Sargassum* no setor da construção civil. Nesse sentido, foram encontrados estudos de aplicação do *Sargassum* como fibras em sistemas construtivos de adobe e como aditivo em compostos para pavimentação.

Considerando a composição química do *Sargassum*, pode-se considerar que há um grande potencial de aplicação dessas macroalgas, seja em sua forma natural ou como aditivos, fibras e cinzas, em diferentes subprodutos do setor da construção civil.

Nesse sentido, o NAP BIOSMAT (Núcleo de Apoio a Pesquisa em Materiais para Biossistemas), da Universidade de São Paulo (USP – Pirassununga), está iniciando um estudo em cooperação com algumas universidades do Caribe e França, por meio do projeto "SARGOOD: Abordagem holística da valorização do *Sargassum*", financiado pela FAPESP e ANR (França), para avaliar o potencial de aplicação dessa macroalga na construção, mais especificamente, como reforço em painéis particulados e compósitos cimentícios (fibrocimento) e das cinzas (obtidas na queima do *Sargassum* para obtenção de energia) como adição mineral em materiais cimentícios e em cerâmicas. Também será realizado a Análise de Ciclo de Vida (ACV) da alga e das possiveis aplicações, de modo a caracterizar os beneficios ambientais das potenciais aplicações do *Sargassum* em materiais de construção.

AGRADECIMENTOS

Os autores dessa trabalho gostariam de agradecer o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que financia essa pesquisa por meio dos processos nº 2019/21007-0 e nº 2019/11949-8, e ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

REFERÊNCIAS

1. Rosado-Espinosa LA, Freile-Pelegrín Y, Hernández-Nuñez E, Robledo D. A comparative study of Sargassum species from the Yucatan Peninsula coast: morphological and chemical characterisation. Phycologia. 2020;59(3):261–71.

2. Fidai YA, Dash J, Tompkins EL, Tonon T. A systematic review of floating and beach landing records of Sargassum beyond the Sargasso Sea . Environ Res Commun. 2020;2(12):122001.

3. Wang M, Hu C, Barnes BB, Mitchum G, Lapointe B, Montoya JP. The great Atlantic Sargassum belt. Science (80-). 2019;364(6448):83–7.

4. Sissini MN, De Barros Barreto MBB, Szećhy MTM, De Lucena MB, Oliveira MC, Gower J, et al. The floating Sargassum (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean - Likely scenarios. Phycologia. 2017;56(3):321–8.

5. Martinelli Filho JE. First record of golden seaweed tides at the Brazilian amazon coast. 2015;1–2.

6. López-Sosa LB, Alvarado-Flores JJ, Corral-Huacuz JC, Aguilera-Mandujano A, Rodríguez-Martínez RE, Guevara-Martínez SJ, et al. A prospective study of the exploitation of pelagic sargassum spp. As a solid biofuel energy source. Appl Sci. 2020;10(23):1–17.

7. Witherington B, Hirama S, Hardy R, Wang M, Hu C, Maurer AS, et al. Young sea turtles of the pelagic Sargassum-dominated drift community: Habitat use, population density, and threats. Mar Ecol Prog Ser. 2016;13(7):394–5.

8. Gower JFR, King SA. Distribution of floating Sargassum in the Gulf of Mexico and the Atlantic ocean mapped using MERIS. Int J Remote Sens. 2011;32(7):1917–29.

9. Smetacek V, Zingone A. Green and golden seaweed tides on the rise. Nature. 2013; 504 (7478): 84–8.

10. Wang M, Hu C. Predicting Sargassum blooms in the Caribbean Sea from MODIS observations. Geophys Res Lett. 2017;44(7):3265–73.

11. Langin K. Seaweed masses assault Caribbean islands. Science (80-). 2018;360(6394):1157–8.

12. Davis D, Simister R, Campbell S, Marston M, Bose S, McQueen-Mason SJ, et al. Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds Sargassum fluitans and S. natans (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. Sci Total Environ. 2021;762(xxxx):143134.

13. Gower J, King S. The distribution of pelagic Sargassum observed with OLCI. Int J Remote Sens. 2020;41(15):5669–79.

14. Rodríguez-Martínez RE, Roy PD, Torrescano-Valle N, Cabanillas-Terán N, Carrillo-Domínguez S, Collado-Vides L, et al. Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. Am J Environ Sci. 2017;13(1):19–30.

15. Arencibia-Carballo G, Irañeta Batallán JM, Morell J, Moreira González AR. Massive beaching Sargassum on the north coast of Cuba. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático. 2020;2(1):19–30.

16. Amador-Castro F, García-Cayuela T, Alper HS, Rodriguez-Martinez V, Carrillo-Nieves D. Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges. J Environ Manage. 2021;283(November 2020).

17. Milledge JJ, Harvey PJ. Golden Tides: Problem or golden opportunity? The valorisation of Sargassum from beach inundations. J Mar Sci Eng. 2016;4(3).

18. Desrochers A, Cox S-A, Oxenford HA, van Tussenbroek BI. Sargassum Uses Guide: A resource for Caribbean researchers, entrepreneurs and policy makers (CERMES Technical Report No. 97 Special Edition). 2020.

19. Thompson TM, Young BR, Baroutian S. Pelagic Sargassum for energy and fertiliser production in the Caribbean: A case study on Barbados. Renew Sustain Energy Rev. 2020;118(April 2019).

20. Milledge JJ, Maneein S, López EA, Bartlett D. Sargassum inundations in Turks and Caicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. Energies. 2020;13(6).

21. Milledge JJ, Nielsen B V., Bailey D. High-value products from macroalgae: the potential uses of the invasive brown seaweed, Sargassum muticum. Rev Environ Sci Biotechnol. 2016;15(1):67–88.

22. Milledge JJ, Smith B, Dyer PW, Harvey P. Macroalgae-derived biofuel: A review of methods of energy extraction from seaweed biomass. Energies. 2014;7(11):7194–222.

23. Jard G, Marfaing H, Carrère H, Delgenes JP, Steyer JP, Dumas C. French Brittany macroalgae screening: Composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products. Bioresour Technol [Internet]. 2013;144:492–8. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.114

24. Alzate-Gaviria L, Domínguez-Maldonado J, Chablé-Villacís R, Olguin-Maciel E, Leal-Bautista RM, Canché-Escamilla G, et al. Presence of polyphenols complex aromatic "Lignin" in Sargassum Spp. From Mexican Caribbean. J Mar Sci Eng. 2021;9(1):1–10.

25. Doh H, Dunno KD, Whiteside WS. Preparation of novel seaweed nanocomposite film from brown seaweeds Laminaria japonica and Sargassum natans. Food Hydrocoll [Internet]. 2020;105:105744. Available from: https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105744

26. Davis D, Simister R, Campbell S, Marston M, Bose S, McQueen-Mason SJ, et al. Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds Sargassum fluitans and S. natans (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. Sci Total Environ. 2021;762:143134.

27. Cheah CB, Tan LE, Ramli M. Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review. Constr Build Mater [Internet]. 2021;272:121657. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121657

28. Salazar-Cruz BA, Zapien-Castillo S, Hernández-Zamora G, Rivera-Armenta JL. Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. Constr Build Mater [Internet]. 2021;271:121876. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121876

29. Desrochers A, Cox S, Oxenford H, Van Tussenbroek B. Sargassum Uses Guide: A resource for Caribbean researchers, entrepreneurs and policy makers Lead. Food Agric Organ United Nations Prod. 2020;(97):100.

30. Kantar C, Cetin Z, Demiray H. In situ stabilization of chromium(VI) in polluted soils using organic ligands: The role of galacturonic, glucuronic and alginic acids. J Hazard Mater. 2008;159(2–3):287–93.

31. Galán-Marín C, Rivera-Gómez C, Petric J. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. Constr Build Mater [Internet]. 2010;24(8):1462–8. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008

32. Dove C. The development of unfired earth bricks using seaweed biopolymers. WIT Trans Built Environ. 2014;142:219–30.

VALORIZAÇÃO DO CAULIM FLINT COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR (MCS)

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081157

MEDEIROS; MATHEUS HENRIQUE GOMES DE[1]; MATOS; SAMILE RAIZA CARVALHO[2]; DESSUY; THAINÁ YASMIN[1]; MASUERO; ANGELA BORGES[1]; DAL MOLIN; DENISE CARPENA COITINHO[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS);
[2] UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA (UFBA).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: MATHEUS96H@GMAIL.COM

RESUMO: O objetivo deste trabalho é verificar o potencial de utilização do resíduo gerado pela indústria papeleira durante a extração do caulim convencional, caulim flint (CF), como MCS. Para isso, o resíduo foi submetido a moagem e diferentes temperaturas de calcinação a fim de aumentar a sua reatividade. A influência destes tratamentos foi verificada de forma indireta por ensaios de caracterização físicos (Granulometria e área superficial B.E.T) e mineralógicos (DRX). Foram realizados ensaios de calorimetria isotérmica e de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. A partir dos resultados obtidos, notou-se que o CF tem potencial de uso como MCS.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduo, MCS, Argila calcinada.

ABSTRACT: The objective of this work is to verify the potential use of the residue generated by the paper industry during the extraction of conventional kaolin, flint kaolin (FC), as SCMs. For this, the residue was submitted to different thermal and physical treatments in order to increase its reactivity. The influence of these treatments was indirectly verified by physical (Granulometry and surface area B.E.T) and mineralogical (XRD) characterization tests. Isothermal calorimetry and compressive strength tests were performed at 7 and 28 days. From the results obtained, it was noted that the CF has potential for use as SCM.

KEYWORDS: Waste, SCM, calcined clay.

1 | INTRODUÇÃO

O uso de MCS em substituição ao cimento Portland representa uma alternativa ambiental promissora para a redução das emissões de CO_2 associada à indústria de cimento [(1)]. A viabilidade de algumas adições amplamente utilizadas depende da disponilidade local e neste aspecto as argilas ganham vantagem por estarem disponiveis em abundância[(2)]. Portanto, o aumento significativo na demanda por cimento e a necessidade de reduzir ainda mais o fator clínquer fazem com que as argilas calcinadas, a temperaturas que variam entre 600°C e 850°C, sejam cada vez mais uma alternativa de uso como MCS[(3)].

O caulim é composto por materiais argilosos, proveniente de rocha com granulometria fina, de coloração branca[(4)]. A região do Rio Capim, no estado do Pará,

é conhecida pelas reservas de caulim destinado para a indústria papeleira com função de cobertura[5]. O caulim utilizado pela indústria do papel, caulim *soft*, é extraído de uma profundidade de 20 metros, aproximadamente. Sobre esta camada há o caulim duro ou *Flint* (CF), composto por argilo-arenosos com altos teores de ferro, em torno de 10%, fato que inviabiliza sua aplicação na indústria [6]. No entanto, o CF é geralmente constituído por argilomineral caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), o que o torna fonte de SiO_2 e Al_2O_3[7]. Assim, o CF possui potencial de uso na indústria cimenteira, como substituinte parcial do cimento[5]. Sendo assim, o presente estudo analisa o uso potencial do CF calcinado a diferentes temperaturas como MCS.

2 | PROGRAMA EXPERIMETAL

2.1 Materiais

Para este trabalho foi utilizado o cimento CP II F-32, agregado miúdo conforme a norma NBR 7215[8], aditivo superplastificante Tec-Flow 8000 (1,1 g/cm³) e o CF como fonte de argilomineral.

O CF foi beneficiado por meio do quarteamento, sendo desagregado manualmente em um almofariz, até Ø < 2,4 mm, com o intuito de aumentar a superfície específica e maior homogeneidade na calcinação. Posteriormente, o resíduo foi submetido a calcinação em 3 diferentes temperaturas, variando a temperatura de queima em 650°C, 750°C e 850°C com patamar de 1 hora e taxa de 10°C/min, em forno mufla (Sanchez – Modelo DTT). O CF foi resfriado bruscamente para conferir maior amorficidade ao material. Os materiais calcinados foram submetidos a um tratamento físico em moinho pulverizador HSM 100 por 15 minutos para reduzir a granulometria, aumentando a sua superfície específica e, consequentemente, a reatividade.

2.2 Métodos

Para analisar a reatividade do CF foram realizadas análises mineralógicas, físicas, índice de pozolanicidade e ensaio de calorimetria.

A análise mineralógica por difração de raio X (DRX) foi realizada com intuito de avaliar a amorficidade do material, utilizando o equipamento Bruker D8 Advance, com filtro de Ni, passo de 0,02°, intervalo 2θ de 5° a 70° (0,72°/min), da Universidade Federal de Santa Maria. Foi utilizado o *software* High Score Plus e o bancos de dados cristalográficos Powder Diffraction File (PDF) para identificação das fases cristalinas.

A granulometria foi realizada no granulômetro Particle Size Analyser, CILAS 1180 Liquid, utilizado água como meio dispersante e aplicando ultrassom 38 kHz/min. Para análise de área superficial, utilizou-se o ensaio de B.E.T. em equipamento NOVA Station A, à vácuo e na temperatura de 300°C por 5 horas, com nitrogênio como adsorvato.

Para avaliar a reatividade do CF, foi realizado o ensaio de índice de pozolanicidade, por meio do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, NBR 7215[8], em Máquina Universal EMIC (DL 20000), em argamassa com a/c 0,48 e aditivo superplastificante até consistencia ±10mm, conforme na NBR 5752[9]. Por fim, foi efetuada a análise de calorimetria isotérmica por 70 horas a 25 ± 0,01°C, em microcalorímetro isotérmico TA *instruments* modelo TAMAir. A mistura foi feita em misturador externo, com rotação de

10 mil rpm, substituindo 25% do cimento, em massa, por CF. O procedimento de ensaio seguiu a ASTM C 1679-17[10].

3 | RESULTADOS

3.1 Análise mineralógica e física do CF

As análises de DRX do CF natural e dos submetidos à calcinação de 650°C (CF 650°C), 750°C (CF 750°C) e 850°C (CF 850°C) são apresentadas na Figura 1. O difratograma do CF natural é típico de um material com predominância de fases cristalinas, nele foi identificada a presença de caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e quartzo (SiO_2). Já nos difratogramas do CF após a calcinação, identificam-se apenas picos correspondentes ao quartzo, o que indica que as calcinações foram efetivas para promover a desidroxilação da caulinita, conferindo uma possível reatividade à amostra por conta do alto grau amorficidade[11]. Sendo assim, após a calcinação proposta, as amostras têm potencial para serem utilizadas como MCS.

O difratograma da amostra calcinada na temperatura de 650°C apresentou um pico de menor intensidade em 2θ= 13°, referente à caulinita cristalina, e alo amorfo indicando que esta temperatura já foi suficiente para reduzir a cristalinidade da amostra. Na temperatura de 850°C, foi observado pico referente à caulinita em 2θ= 35,5°, que pode estar relacionado a um processo de recristalinização[12]. Com relação a temperatura de 750°C não foram observados picos nesses graus 2θ identificados nas demais amostras. Deste ensaio, nota-se que todas as temperaturas de calcinação foram suficientes para reduzir a cristalinidade do material.

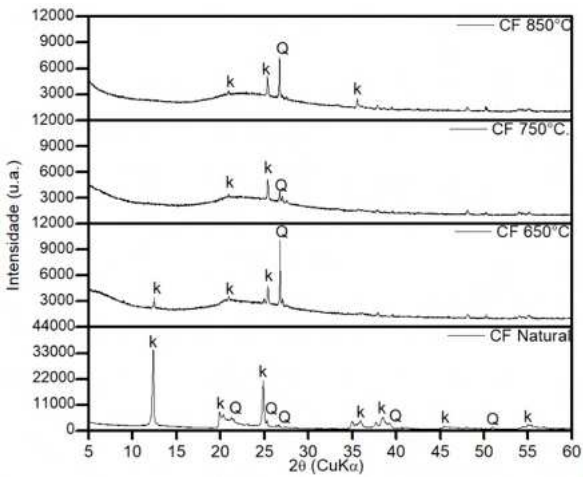


Figura 1 – Difratogramas do CF natural e com as calcinações em 650°C, 750°C e 850°C (5 a 65°): k: Caulinita: PDF 01-078-2109 e Q:Quartzo: PDF 01-083-0539. Análise com Filtro de Ni, passo 0,02°, 0,72°/min.

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 1 traz os resultados das análises de granulometria a laser e área específica por B.E.T do cimento utilizado e do CF após as calcinações em três diferentes temperaturas e moagem.

Material	Tempo de moagem (min)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Dm (µm)	Área específica BET (m²/g)
CP-II-F	-	0,34	-	35,78	12,84	5,786
CF 650°C	15	5,66	110,22	359,21	149,01	13,183
CF 750°C	15	5,65	105,36	355,54	145,76	13,208
CF 850°C	15	5,46	114,68	367,82	153,83	13,947

Tabela 1 – Características físicas.

Todas as amostras de CF calcinadas possuem diâmetro médio superiores ao do cimento utilizado e ao estabelecido pela NBR 12653[9] (Tabela 1). Apesar disso, apresentam área superficial superior à do cimento, 13,45 m²/g, mesmo tendo partículas maiores. A área superficieal observada é proxima á identificada em outros estudos com CF[13]. De modo geral, nota-se que as diferentes temparturas de calcinação não tiveram grande influência nas propriedades físicas dos materiais.

3.2 Influência da argila na matriz cimentícia

A análise da influência das temperaturas de calcinação do CF nas reações de hidratação é mostrada nas figuras 2a e 2b através das curvas de calorimetria e os principais eventos térmicos observados estão resumidos na Tabela 2.

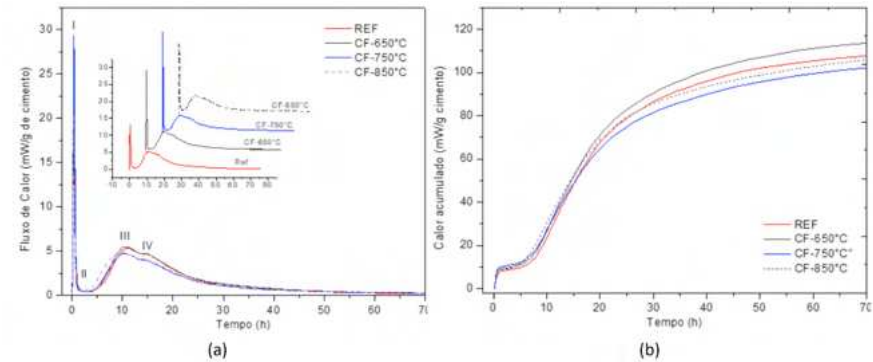


Figura 2 – Curva de calorimetria isotérmica das pastas de cimentos REF, CF-650°C, CF-750°C e CF-850°C, normalizados pela massa do cimento. (a)I: Dissolução; II: Indução; III: Aceleração; IV: Depleção de Sulfatos. (b) Calor acumulado (J/g) em 70 horas.

Fonte: Autoria Própria.

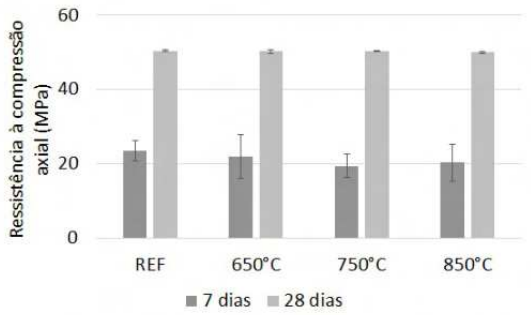
Evento	REF	CF - 650°c	CF - 750°c	CF - 850°c
Tempo de pega (horas)	7,29	6,90	6,99	6,46
Tempo de indução (horas)	2,55	2,47	2,10	1,72
Calor acumulado (mW/g)	107,70	113,55	102,18	105,84

Tabela 2 – Quadro resumo dos parâmetros obtidos por calorimetria isotérmica utilizando a C1679 – 17[10].

Independente da temperatura de calcinação, o CF na matriz cimentícia favoreceu a dissolução das fases anidras nas primeiras horas, resultando no aumento do pico de dissolução das fases aluminatos (I) [14], conforme Figura 2a. Além disso, para as amostras CF-650°C, CF-750°C e CF-850° houve uma redução de aproximadamente 5, 27 e 50 minutos no período de indução (II), respectivamente (Tabela 2). Isto pode estar associado ao efeito fíler do resíduo que antecipa a retomada das reações, devido principalmente à nucleação heterogênea de silicatos (III) [11], de acordo com a Figura 2a e a Tabela 2. Nota-se também que a presença do CF não influenciou no teor ótimo de sulfatos, uma vez que não houve alteração no pico de depleção de sulfatos (IV) que se manteve após a o pico de silicatos (III), segundo a Figura 2a.

Observa-se que o CF, independente da temperatura de calcinação, reduziu o tempo de pega das pastas em até 50 minutos, confirmando o efeito fíler que acelera as reações de hidratação, sendo o CF-850°C o que mais acelerou este tempo (Tabela 2). Conforme a figura 2b e tabela 2, nota-se que a CF-650°C foi a que apresentou maior calor acumulado a 70 horas, seguido da REF, CF-850°C e da CF-750°C.

A Figura 3 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias e o índice de atividade pozolânica (IAP).



	REF	650°C	750°C	850°C
7 dias	23,54	21,95	19,47	20,35
28 dias	50,46	50,29	50,32	50,00
IAP		99,68	100,05	99,37

Figura 3 –Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados apresentados na figura 3 mostram que o aumento da temperatura não implicou em diferença significativa na resistência à compressão nas idades avaliadas. Para as três temperaturas de calcinação analisadas, as amostras se comportam de forma semelhante à família controle (REF). Aos 7 dias, observa-se que a CF-650°C apresentou a maior resistência a compressão (86% da REF), seguida das argamassas CF-850°C e CF-750°C, que atingiram 85% e 80%, respectivamente. Este comportamento é compatível com os resultados de calor acumulado observado na Tabela 2, uma vez que o calor acumulado está relacionado à maior hidratação da matriz, logo maiores teores de produtos hidratados, dentre eles o C-S-H, principal responsável por conferir resistência à matriz. Apesar da redução de 25% no teor de cimento, não houve uma perda proporcional na resistência à compressão das amostras aos 7 dias, indicando um possível efeito fíler do CF. Nesta idade, este ganho compensatório de resistência não pode ser associado à ação pozolânica, pois esta ocorre em maiores idades devido ao maior teor de portlandita na matriz cimentícia que confere a alcalinidade necessária para que ocorrência da reação.

Aos 28 dias, as argamassas com CF atingiram resistências semelhantes, independente da temperatura de calcinação. Analisando o critério de atividade pozolânica da norma (IAP), todas as amostras com CF tiveram índices superiores a 90%, confirmando o efeito pozolânico do material [9,11,15]. Com relação à referência, nota-se que a substituição do cimento por CF não comprometeu a resistência à compressão, visto que todas as amostras apresentaram IAP em torno de 100%.

Sendo assim, nota-se que o CF tem um potencial para ser utilizado como material cimentício suplementar, pois mesmo com granulometria superior à do cimento utilizado, as argamassas com CF e com menor teor de cimento atingiram resistências semelhantes à da argamassa de referência nas primeiras idades. Portanto, a redução do tamanho das partículas poderá melhorar o desempenho deste material.

4 | CONCLUSÕES

A partir deste estudo foi possível concluir que:

- As temperaturas de calcinação do CF avaliadas foram eficientes para promover a desidroxilação e amorfização da caulinita, tornando-a potencialmente reativa;
- A calcinação têm pouca influência no diâmetro médio e na área superficial das partículas, vale ressaltar que o CF apresentou granulometria e área superficial superiores às do cimento utilizado;
- O CF tem potencial para ser utilizado como MCS por conta do efeito fíler observado pela aceleração das reações de hidratação e da manutenção da resistência aos 7 dias;
- Aos 28 dias o CF apresentou IAP próximo de 100%, independente da temperatura de calcinação, demonstrando que além do efeito fíler o material apresenta pozolanicidade;
- Com relação as temperaturas, a de 650°C foi a mais eficiente, pois conferiu maior calor acumulado e resistência a 7 dias com menor gasto energético.

REFERÊNCIAS

1. JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 71–80, 2015.

2. MARTIRENA, Fernando; FAVIER, Aurélie; SCRIVENER, Karen (Ed.). Calcined Clays for Sustainable Concrete: **Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete**. Springer, 2017.

3. LEMMA, Roxana; IRASSAR, Edgardo F.; RAHHAL, Viviana. Calcined illitic clays as Portland cement replacements. In: **Calcined Clays for Sustainable Concrete**. Springer, Dordrecht, 2015. p. 269-276.

4. LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E. A.; BERTOLINO, L. C. Caulim -Usos e Especificações. In: **Rochas e Minerais Industriais**. 1.ed, cap. 11. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2005. p. 237-255.

5. PÖLLMANN, H., COSTA, M. L., ANGELICA, R. Sustainable Secondary Resources from Brazilian Kaolin Deposits for the Production of Calcined Clays. Calcined Clays for Sustainable Concrete. **Rilem bookseries, Karen Scrivener and Aurélie Favier Editors**, v.10, p. 21-26, 2015.

6. CARNEIRO, B. S., ANGELA, R. S., SCHELLER, T., CASTRO, E. A. S. De, NEVES, R. F. Caracterização mineralógica e geoquímica e estudo das transformações de fase do caulim duro da região do Rio Capim, Pará. **Cerâmica**, 2003, vol.49, n.312, pp.237-244.

7. MAIA, A. A. B., SALDANHA, E., ANGÉLICA, R. S., SOUZA, C. A., NEVES, R. F. Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese da zeólita A. **Cerâmica**, 53: 319-324, 2007.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752** Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2015.

10. ASTM C1679-17, Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

11. SHUI, K.; YUAN, K.; SUN, T.; LI, Q.; ZENG, W. **Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete**. [*S. l.*: *s. n.*], 2015.

12. FERREIRO, S. et al. Influence of fineness of raw clay and calcination temperature on the performance of calcined clay-limestone blended cements. **Applied Clay Science**, v. 169, p. 81-90, 2019.

13. OLIVEIRA, Alex de Nazaré de et al. Acetylation of Eugenol on Functionalized Mesoporous Aluminosilicates Synthesized from Amazonian Flint Kaolin. **Catalysts**, v. 10, n. 5, p. 478, 2020.

14. SCRIVENER, K.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38-56, 2015.

15. DA CUNHA, A. L. C.; LEMOS, M. S.; METH, S.; GONÇALVES, J. P.; DWECK, J. A study of the particle size effect on the pozzolanic activity of an equilibrium catalyst. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, vol. 106, no. 3, p. 805–809, 2011. https://doi.org/10.1007/s10973-011-1399-7.

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO_2 DE PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL: COMPARAÇÃO ENTRE O USO DE AGREGADOS DE RCD E NATURAIS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081158

CASARIN; ROBERTA P.[1]; ARAGÃO; LUCAS C.[1]; ZAPPE; ANNA PAULA S. [1]; THOMAS; MAURICIO[1]; PASSUELO; ANA CAROLINA B. [1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: ROBERTAPCASARIN@GMAIL.COM

RESUMO: O presente trabalho é um estudo de caso de pavimento de concreto permeável destinado a estacionamento construído para a aplicação da metodologia de realização de inventário de emissões de CO_2. O objetivo foi comparar dois métodos construtivos desse pavimento: um com agregado reciclado proveniente de corpos de prova da construção de uma ponte e outro com a hipótese de utilização de agregado natural de pedreira. Aponta-se que o uso de agregados naturais nesse tipo de pavimento aumenta o impacto nas emissões de CO_2 quando em comparação ao uso dos agregados reciclados, porém essa diferença torna-se diminuta ao considerar emissões do cimento.

PALAVRAS-CHAVES: Emissões de CO_2; agregados naturais; agregados reciclados; concreto permeável; impacto ambiental.

ABSTRACT: This study uses the CO_2 inventory emission methodology in the product and construction phases to compare two construction methods of permeable concrete pavement: the first one using recycled aggregate originated from specimens of the construction of a bridge, and the other, (as a hypothesis) if natural aggregate from a quarry was used. It is pointed that the use of natural aggregates in this type of pavement increases the CO_2 emission, when in comparison with the use of construction and demolition waste (CDW) aggregates. Nevertheless, that difference is low when the high emissions by cement are considered.

KEYWORDS: Permeable concrete; aggregate; CDW; environmental impact.

1 | INTRODUÇÃO

A crescente taxa de urbanização das cidades traz consigo o problema de ocupação de solos drenantes por materiais que tornam a superfície impermeável, aumentando a possibilidade de inundações e podendo provocar, no caso dos pavimentos, o efeito da aquaplanagem. Com a finalidade de minimizar estes efeitos, foi desenvolvido o concreto com a ausência de partículas finas em sua composição, permitindo a passagem de água até a profundidade da camada de base ou sub-base [1; 2; 3]. O pavimento permeável, apesar de substituir a estrutura de pavimento convencional, pode ser aplicado apenas para tráfego de baixa velocidade, veículos leves e caminhões com cargas não pesadas, sendo assim mais indicado para estacionamentos [4; 5; 6]. Isso se dá pelo fato de que a ausência dos finos na composição do pavimento reduz a capacidade deste em resistir a solicitações mais pesadas. Em contrapartida, deve-se buscar um equilíbrio entre

resistência e permeabilidade [7].

É importante ressaltar que os pavimentos drenantes devem corresponder os pré-requisitos mínimos estabelecidos pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015)[8] na questão de permeabilidade e resistência à compressão. Sendo assim, conforme a norma, para esse tipo de concreto poroso usado para pavimentação é necessário um maior consumo de cimento quando se comparando com o pavimento de concreto convencional. Segundo Caldas *et al.* (2017) [9], outra questão peculiar em relação ao concreto permeável é a sua baixa relação água/cimento e o fato de não apresentar boa manutenibilidade no estado plástico, fazendo com que se perca rapidamente a capacidade de trabalhabilidade.

De acordo com este cenário, este estudo possui o objetivo de avaliar comparativamente os impactos ambientais causados pela produção de dois tipos de pavimentos permeáveis: o primeiro é o do pavimento construído, que foi constituído com agregado de resíduo de construção e demolição (RCD) obtido do processo de britagem de corpos de prova de concreto cilíndricos moldados em obra de construção de ponte; enquanto o outro tipo considerou a hipótese de que a construção do mesmo pavimento foi feita com agregado natural, extraído e britado dentro de pedreira. A principal motivação do trabalho foi avaliar até que ponto o material reciclado apresenta menor impacto ambiental do que a extração do material virgem, considerando apenas as fases de produto e construção, (assumindo-se que nas fases de uso e fim de vida a manutenção e o descarte serão os mesmos para ambos os tipos de pavimento permeável).

2 | METODOLOGIA

A implementação da metodologia de análise de inventário de emissões de CO_2 realizada neste estudo, baseada nas normas NBR 14040/14044 (ABNT, 2009)[10], foi dividida em quatro etapas: primeiramente a definição do objetivo e escopo; em segundo lugar foi realizada a análise do inventário; em seguida a quantificação dos impactos; e, por fim, a interpretação dos resultados.

2.1 Objetivo e escopo

Os objetivos do presente trabalho consistem em avaliar os impactos ambientais da fase de produto e construção de uma pista de estacionamento em concreto permeável produzido com 100% de agregado de concreto reciclado, através de ferramenta de avaliação do ciclo de vida, e comparar os impactos ambientais analisados com a construção de uma pista semelhante empregando apenas agregados naturais. As fases de uso, manutenção e fim de vida da estrutura não são consideradas, partindo-se do pressuposto que são bastante similares para qualquer das utilizações de pavimentos analisados, sejam com agregados de RCD ou naturais[11]. Os limites do sistema, portanto, estão estabelecidos a partir da obtenção das matérias-primas (com transporte na região metrotopolitana de Porto Alegre até o local da obra) e fim na construção do pavimento (Figura 1).

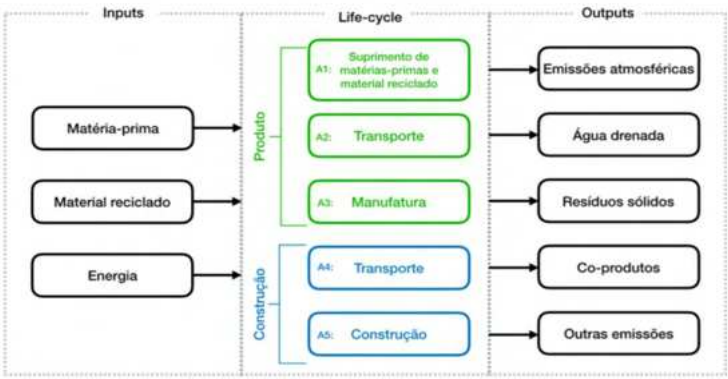


Figura 1 – Fronteiras do sistema: fases de produto (A1-A3) e de construção (A4 e A5)

Fonte: elaborado pelos autores

Com o intuito de identificar os impactos ambientais da pista de estacionamento de concreto permeável e compará-los com os impactos provocados por outros pavimentos, a unidade funcional estabelecida para a análise foi a de um metro linear de faixa de pista de rolamento de veículos, considerando que a largura total era de 3,5 m. A área total construída no estudo de caso foi de 3,5 m x 3,5 m, que é a faixa de concreto permeável com agregado reciclado construída no estudo de caso aqui analisado[11].

Para a avaliação desta unidade funcional foi considerado um sistema com subdivisões das camadas superiores do pavimento até as inferiores: a camada superficial e final de rolamento de concreto permeável (subsistema 1), seguida de base de brita tipo 1 com 30% de poros (subsistema 2), e camada de proteção constituída de areia (subsistema 3), que serve para não perfurar a última camada. Esta última camada é de lona (subsistema 4) - com a função de impermeabilizar o subleito e direcionar a água drenada para a tubulação coletora, sendo o sistema de coleta de águas considerado o subsistema 5 (Figura 2).

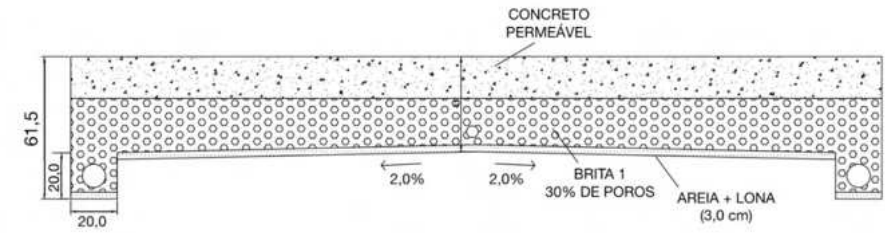


Figura 2 – Seção transversal do projeto da unidade funcional analisada

Fonte: elaborado pelos autores

2.2 Análise do inventário

Os conjuntos de dados gerais para realização do inventário de ciclo de vida (ICV), caracterizando o pavimento e quantificando cada uma das entradas nos subsistemas são dados específicos, fornecidos pela projetista da pista [11]. Informações referentes às distâncias de transporte consideradas foram também coletados com a projetista a partir da informação dos fornecedores e, posteriormente, calculados genericamente através do *Google Maps*. Conjuntos de dados referentes ao uso dos equipamentos são secundários e determinados conforme especificação nas fichas técnicas do maquinário utilizado.

2.3 Avaliação do impacto ambiental

Foi selecionada somente uma categoria de impacto ambiental, que foi aquecimento global, representada pelas emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2) – essa escolha se deu porque essa era a única categoria com dados disponíveis para todas as entradas, e também, porque é uma das mais significativas no impacto ambiental. Para análise do inventário foi utilizada como principal fonte de coleta de emissão de CO_2 a base de dados do ICE (*Inventory of Carbon and Energy – Embodied Carbon*) versão 3.0 (2019), que tem o foco em construção. Para os casos em que não foi possível encontrar os produtos ou materiais nessa base de dados, foram utilizadas as bases de dados do *Federal LCA Commons* e da *Ecoinvent* versão 3. Sempre que possível, os dados da plataforma Ecoinvent foram obtidos para o Brasil, ou, em segundo caso, para a região denominada "GLO (global)", que caracteriza o mundo inteiro. Todas as bases de dados estrangeiras são de livre acesso por *websites* e são utilizadas sob o pressuposto de que os conjuntos de dados encontrados nelas são representativos para o estudo de caso e suficientes para a análise. Dessa forma, os dados utilizados para a obtenção do CO_2 embutido são genéricos e primários, e calculados através do *software Excel* – tanto para o balanço dos fluxo de entada e saída quanto para o cálculo dos impactos ambientais.

Todos os processos apresentados são de primeiro plano, com exceção das distâncias de transporte que foram calculadas separadamente para cada produto levado até a obra, e convertidas em impacto do uso do diesel. Identifica-se como principal limitação do estudo a utilização de bases de dados externas em conjuntos de dados nacionais, que pode vir a não representar de maneira fidedigna a realidade do caso em análise. Outras limitações são: podem não fazer parte alguns processos de segundo plano de cada material ou produto que não estão considerados nas platafomas *LCA* e *Ecoinvent*; e alguns itens não encontrados nas bases de dados ou de grande detalhamento (como utensílios, ferramentas e materiais de fixação) não foram acrescentados na análise.

Ainda assim, a qualidade dos dados utilizados para este trabalho é considerada adequada para o objetivo da análise de emissões de CO_2 equivalente de um pavimento, de acordo com os requisitos da norma NBR ISO 14044 adotada.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme mencionado, todos os quantitativos de dados foram obtidos do trabalho

de Strieder (2020)[11], com os valores reais utilizados e calculados para a obra. Cabe novamente ressaltar que nesta etapa de inventário e obtenção de CO_2 embutido alguns componentes e procedimentos foram excluídos da análise porque não foram encontrados em nenhuma base de dados, sendo eles: lona para cura no subsistema 1; energia da placa vibratória no subsistema 2; e lona de impermeabilização no subsistema 4.

3.1 Comparação entre cenários

Pela análise das emissões totais, considerando-se todos os subsistemas, se obteve um resultado muito semelhante para os dois tipos de pavimento (Figura 3). Nota-se que há uma maior diferença de fato na camada de revestimento de concreto permeável (subsistema 1), e por esse motivo, escolheu-se analisá-la isoladamente nos dois pavimentos.

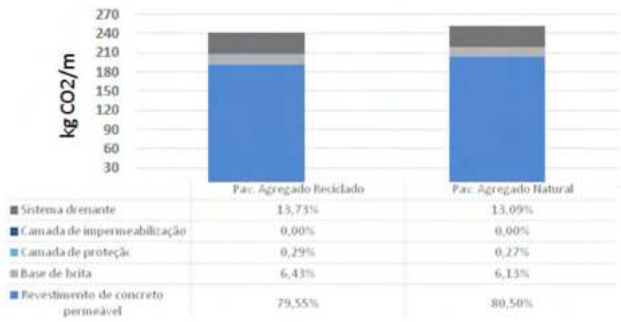


Figura 3 – Emissões totais (considerando todos os subsistemas)

Fonte: elaborado pelos autores

Pela análise isolada do subsistema 1 nos concretos permeáveis (Figura 4), nota-se que o transporte tem maior influência nas emissões de CO_2 para o caso de uso de agregado de RCD. No entanto, a contribuição nessas emissões é muito mais elevada em decorrência do uso dos materiais de construção que compõem o concreto. Além disso, o valor total das emissões dos constituintes é muito próximo nos dois diferentes tipos de agregados.

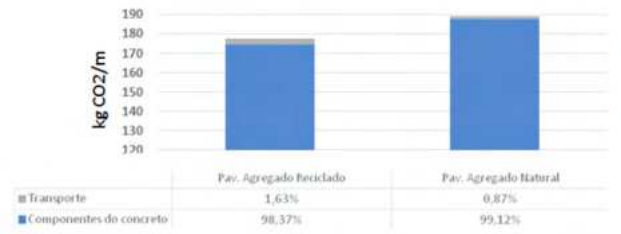


Figura 4 – Emissões do subsistema 1 (camada de concreto permeável)

Fonte: elaborado pelos autores

A partir disso, se fez uma análise considerando somente os componentes do concreto, na qual foi possível identificar o grande peso da contribuição do cimento nessas emissões. Em uma análise considerando que o pavimento é feito só de cimento e agregado (Figura 5), o cimento é responsável por aproximadamente 96% das emissões de CO_2 – valor praticamente idêntico para os dois tipos de agregados.

Sendo assim, optou-se pela análise direcionada somente ao agregado de fato, usado nos dois diferentes tipos de concreto permeáveis, a fim de verificar o efeito isolado de cada um deles. O resultado para a análise do agregado e do seu transporte para cada caso está apresentado na Figura 6.

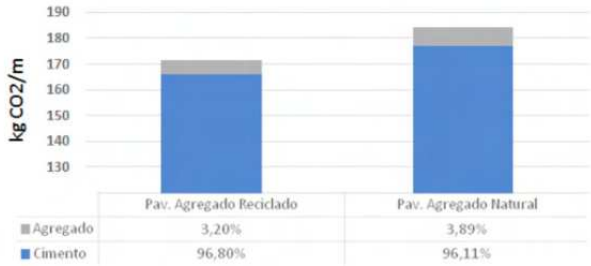


Figura 5 – Emissões do subsistema 1 (considerando somente o cimento e o agregado)

Fonte: elaborado pelos autores

Foi possível então notar que há um maior impacto do transporte do agregado de RCD até o local em que foi construído o pavimento do que em comparação com o transporte caso fosse utilizado o agregado natural. No entanto, o impacto total associado ao uso e transporte do agregado de RCD no concreto permeável ainda é menor do que no caso do uso de agregado natural. Esse fato pode ser explicado: a possível pedreira de onde seriam obtidos os agregados naturais é muito próxima do local onde foi construído o pavimento (aproximadamente 6,2 km).



Figura 6 – Emissões do subsistema 1 (considerando o agregado e o seu transporte)

Fonte: elaborado pelos autores

Considerando um cenário em que o RCD passasse a ter maior emissão de CO_2 do

que o agregado natural se calcula, por essa análise definida pelos critérios que um dos dois fatores quanto ao transporte deveria acontecer: a distância do transporte de RCD até o local da obra aumentasse em aproximadamente 2 km ou mais; ou a distância da pedreira até o local da obra reduzisse em apenas 0,150 km ou mais.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo possibilitou estudar o impacto das emissões de CO_2 para um estudo de caso de fases de produto e construção de um pavimento de concreto permeável utilizando agregados provenientes de resíduos de construção e demolição comparativamente ao uso de agregados naturais. Em primeira análise, verificando-se todos os componentes do pavimento, foi possível perceber que as proporções de impacto são bem semelhantes, mas na soma total da emissão de CO_2 é superior para o caso de concreto permeável com agregado natural.

De forma geral, em todas as análises feitas, o sistema de produto apresentou mais impacto quando considerando a utilização do agregado natural. No entanto, o trabalho mostrou que o impacto da utilização de cimento é significativamente superior ao do uso de agregados – da ordem de 96 vezes. Também foi possível concluir que, ao se verificar somente o impacto do cimento e dos agregados nesse pavimento, as emissões de CO_2 praticamente se igualam em porcentagem, para os dois casos. O trabalho de Caldas *et al.* (2017)[9], em que foi analisado o ciclo de vida em pavimentos de concreto drenante considerando diferentes unidades funcionais, também apontou a elevada contribuição do impacto do cimento em pavimentos de concreto permeáveis.

Por fim, verificou-se que pequenas variações nas distâncias de transporte podem ocasionar diferenças significativas nos resultados (quando a análise considera somente os agregados e o seu transporte). Sugere-se, para estudos mais conclusivos, que os agregados sejam estudados isoladamente considerando fluxos de segundo plano, ou aplicados em sistemas construtivos que não utilizem materiais de grande impacto ambiental, como aqui ocasionado pelo cimento.

REFERÊNCIAS

1. Wanielista, M.; Chopra, M.; Spence, J.; Ballock, C.; **Hydraulic Performance Assessment of Permeable Concrete Pavements for Stormwater Management Credit**. A final report prepared for the Florida Department of Transportation, 2007.

2. Lee, M. G.; Tia, M.; Chuang, S. H.; Huang, Y.; Chiang, C. L. **Pollution and Purification Study of the Permeable Concrete Pavement Material**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 26, ed. 8, 2013.

3. Ullate, E. G.; Lopez, E. C.; Fresno, D. C.; Bayon, J. R.; **Analysis and Contrast of Different Pervious Pavements for Management of Storm-Water in a Parking Area in Northern Spain**. Water Resource Management, v. 25, p. 1525-1535, 2011.

4. Cackler, E. T., Ferragut, T., Harrington, D. S., Rasmussen, R. O., and Wiegand, P. **Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods**. Technical report prepared for the Federal Highway Administration under Cooperative Agreement, 2006.

5. Garber, S; Rasmussen, R. O.; Harrington, D. **Guide to Cement-Based Integrated Pavement Solutions**. Technical report prepared for the Portland Cement Association, 2011.

6. Weiss, P. T.; Kayhanian, M.; Gulliver, J. S.; Khazanovich, L. **Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps**. International Journal of Pavement Engineering, v.20, ed. 2, p. 143-162, 2017.

7. Chandrappa, A. K.; & Biligiri, K. P. **Pervious concrete as a sustainable pavement material–Research findings and future prospects: A state-of-the-art review**. Construction and Building Materials, v. 111, p.262-274, 2016.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

9. Caldas, L. R.; Lins, D. N.; Sposto, R. M. **Avaliação do ciclo de vida de pavimento de concreto drenante considerando diferentes unidades funcionais**. Mix Sustentável, v.3, n. 3, p. 14-23. Florianópolis, 2017.

10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

11. Strieder, H. L. **Estudo do uso de agregado de concreto reciclado em concreto permeável para pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

O IMPACTO AMBIENTAL DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOB A VISÃO DO CICLO DE VIDA

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081159

KONZEN; BÁRBARA ANNE DALLA VECHIA[1]; PEREIRA; ANDRÉA FRANCO[1]
[1]ESCOLA DE ARQUITETURA E DESIGN DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: BARBARADVK@GMAIL.COM

RESUMO: O setor da construção civil tem contribuído de modo representativo para a geração de Resíduos Sólidos Urbanos e representa potencial capacidade para incorporar os próprios rejeitos, assim como coprodutos de outros sistemas. Este trabalho objetiva compreender o estado da arte do impacto ambiental do reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD) por meio de Avaliação do Ciclo de Vida. Para isso, foram levantados artigos dos últimos dez anos partindo-se dos termos "*construction waste*" e "*life cycle assessment*". Os resultados discutem quais softwares e métodos mais utilizados e os impactos ambientais mais representativos do reaproveitamento dos RCD.

PALAVRAS-CHAVES: Avaliação do Ciclo de Vida, impacto ambiental, materiais de construção, reaproveitamento, RCD.

ABSTRACT: The construction sector has contributed in a representative way for the generation of municipal solid waste and represents potential capacity to incorporate the tailings themselves, as well as co-products of other systems.This work aims to understand the state of the art of the environmental impact of construction and demolition waste (CDW) reuse, through Life Cycle Assessment. For this, articles from the last ten years were surveyed based on the terms "construction waste" and "life cycle assessment". The results discuss which software and methods are most used and the most representative environmental impacts of the reuse of CDW.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment, environmental impact, construction materials, reuse, CDW.

1 | INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por 56% do volume de resíduos Sólidos Urbanos coletados no Brasil anualmente, afinal das 79 milhões de toneladas coletadas no ano de 2019, 44,5 são RCD (Resíduo de Construção e Demolição) (1). Considerando tal representatividade, é natural se esperar que o setor que mais contribui para tal geração e resíduos, seja o maior responsável pela reincorporação desse material. O uso dos RCDs como matéria-prima para produção de outros materiais de construção civil vem crescendo como uma solução viável para a reinserção desses materiais no próprio setor.

Ainda que o reaproveitamento pareça ser, ambientalmente, a solução mais interessante, alguns processos intrínsecos a essas ações podem causar impactos significativos. Emissões de CO_2 por transportes, assim como o consumo de água e

energia, entre outros processos industriais, são alguns exemplos. Por isto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método válido a ser empregado como fundamentação para a validação da discussão.

ACV é um método que quantifica o impacto ambiental de produtos, processos ou sistemas, por meio de diferentes categorias de impacto, podendo ser identificada a contribuição de cada etapa do ciclo de vida. O método é definido pela ABNT NBR ISO 14040[2], que orienta seu desenvolvimento em quatro etapas: 1) definição do objetivo e do escopo; 2) análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV); 3) avaliação dos impactos e 4) interpretação. Atualmente, o método pode ser aplicado a partir de softwares e de bases de dados.

Deste modo, se justifica a análise do estado da arte do tema, a fim de identificar quais softwares, bases de dados, metodologias de cálculo e categorias de impacto são mais empregados nos estudos já desenvolvidos, a fim de se fundamentar futuras pesquisas.

2 | METODOLOGIA

Para esta revisão bibliográfica, utilizou-se como fonte principal a busca avançada disponível pelo Portal de Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior). Foram utilizados os termos de referência "*construction waste*" e "*life cycle assessment*", filtrados pelos últimos dez anos, partindo da data de 01/01/2011, revisados por pares. A partir disso, foram encontrados 19 artigos, todos considerados pertinentes e relacionados diretamente com o tema de pesquisa proposto, afinal, apresentam estudos de caso de ACV ou ICV, revisões bibliográficas ou análises que vinculam o impacto ambiental analisado por quaisquer que sejam as categorias de impacto. A partir da análise desses estudos, algumas informações relevantes para futuras pesquisasforam levantadas e organizadas na Tabela 1 a fim de facilitar a compreensão geral dos trabalhos. O levantamento de tais dados permite que futuras pesquisas sejam mais direcionadas, seja para atender a uma lacuna de pesquisa e comparar casos similares, seja para identificar quais os métodos comumente utilizados para fundamentar novas análises. Sendo assim, a Tabela 1 abaixo destaca informações relevantes dos 19 artigos analisados:

AUTOR E LOCAL	LIMITES DO SISTEMA	SOFTWARE, MÉTODO E BASE DE DADOS	UNIDADE FUNCIONAL	CONCLUSÃO
Mercante *et al*., 2012 - Espanha	Tratamento do resíduo, incluindo armazenamento, triagem, reaproveitamento ou aterro. Engloba geração e consumo de energia e combustíveis. Não considera a manutenção da infraestrutura.	Elaboração de ICV. Dados coletados em empresas espanholas envolvidas com ciclo de vida destes materiais.	1 T RCD	Os maiores impactos encontram-se nos processos de moagem e separação granular por peneiramento e limpeza. O impacto das instalações de triagem e tratamento de resíduos pode ser reduzido por ações de coleta seletiva. Os transportes representam papel decisivo e a reciclagem nem sempre é benéfica.
Sudarno, Purwanto e Pratikso, 2013 - Indonésia	Produção de pavimento asfáltico utilizando de agregado reciclado de cimento (2100m² por dia).	Cálculo matemático de emissões a partir da quantidade de asfalto produzida e consumo de energia e combustíveis por tonelada de asfalto produzido.	1 km rodovia	Consumo de energia de 225,46 MJ/km e emissões de 17,43 T.CO2/km. A implementação de pavimentos rodoviários utilizando de reciclagem utiliza energia de modo mais eficiente e produz menos gases de efeito estufa.
Butera, Christensen e Astrup, 2015 - Dinamarca	Gestão do resíduo até a utilização do RCD como agregado para a construção e rodovias	Software não identificado. Métodos diversos. Fonte de dados diversa.	Gestão 1 mg de RCD separado em obra	Para a maioria das categorias de impacto, o aproveitamento dos RCDs é preferível ao aterro. Transportes são responsáveis pela maioria dos impactos relacionados ao aquecimento global, e por isso, os autores recomendam delimitar distâncias menores que 40km a fim de garantir a sustentabilidade do sistema.
Bovea e Powell, 2016 - Espanha e Reino Unido	Revisão bibliográfica quanto a performance do RCD ao longo do ciclo de vida.	Periódicos. Estudos de ACV que englobam a gestão do RCD.	-	A reciclagem fora da obra e a incineração combinadas com aterro são as alternativas mais implementadas. O reaproveitamento ou reciclagem no local é a estratégia menos utilizada.

Kucukvar, Egilmez e Tatari, 2016 - Florida	Produção de materiais de construção brutos e reciclados	Método matemático. Fonte por referências.	Construção 1 edifício	Reciclagem de metais contribuiu para a redução da pegada de carbono. Reciclagem do asfalto e do concreto aumentou a pegada de carbono devido ao alto consumo de combustíveis e às emissões do processo de britagem da reciclagem.
Penteado e Rosado, 2016 - Brasil	Seis cenários que combinam separação, aterro, reciclagem e reaproveitamento de RCD para o aterro de rodovias em diferentes porcentagens	CML 2 2001. Levantamento de campo, revisão bibliográfica e base de dados Ecoinvent 3.1.	0,8 T RCD	A reciclagem é benéfica quando houver separação dos materiais em obra por evitar transporte para instalações de triagem e quando distância entre fonte e reciclagem for menor que 30km. Depleção de recursos abióticos representa o impacto mais relevante em todos os cenários, principalmente devido ao consumo de combustíveis não renováveis. Quanto mais altos os índices de reciclagem, mais altos os impactos relacionados aos transportes. O aquecimento global apresenta impactos negativos pois o impacto evitado pelo reaproveitamento é maior que o causado por transportes e reciclagem.
Yahya, Boussabaine e Alzaed, 2016 - Reino Unido	Eco-custo do gestão de RCDs metálicos, ferrosos e não- ferrosos em três cenários: Aterro, reciclagem e separação.	Eco-indicator 95. Matemático. Ecoinvent.	1 kg RCD metálico	Os impactos ambientais da gestão dos resíduos metálicos dão-se principalmente devido à queima do diesel do maquinário utilizado no processo de demolição e dos veículos de transporte.
Bizcocho e Llatas, 2018 - Espanha	Gestão de resíduos e exploração de cenários de prevenção de RCD por meio de estudo de caso em novos edifícios.	SimaPro 7.1. Ecoinvent v.2.	1 construção 13910 m², dois cenários	A prevenção da geração de resíduo é sempre o cenário mais favorável.

Borghi, Pantini e Rigamonti, 2018 - Itália	Diferentes cenários de gestão de RCDs não perigosos, sendo que o cenário de reciclagem, sugere o uso como agregado reciclado de concreto e de pavimentação de rodovias.	SimaPro 8.3. ILCD 2011 e CED. Coleta de dados e experimentação.	1 T RCD não-perigoso	Os impactos ambientais da reciclagem são maiores que os benefícios. Simultaneamente, o sistema usual possui melhor performance do que cenários de aterro. O melhor cenário foi definido pela otimização do sistema usual. Aterro sanitário representa os maiores impactos em toxicidade humana agentes não-cancerígenos e ecotoxicidade de água doce. No sistema de gestão de RCD corrente, os transportes representam os maiores impactos em 9 das 15 categorias analisadas. A reciclagem causa os maiores impactos em 4 categorias: toxicidade humana por agentes cancerígenos, eutrofização de água doce, depleção de recursos hídricos e outros recursos naturais. Minimizar os transportes pode ser uma solução para a redução dos impactos.
Colangelo *et al*., 2018 - Itália	Transportes, produção, tratamento e descarte de quatro diferentes misturas de concreto: RCD, cinzas de incineração, lama de mármore e escória de alto-forno.	SimaPro 8. Eco-indicator 99.	1 m³ concreto com agregado reciclado	O uso de agregados reciclados apresenta melhores resultados do que o concreto convencional em todas as categorias de impacto. A mistura com escória de alto forno representa os menores impactos na maioria das categorias. RCD e cinzas de incineração oscilam com valores medianos, e a mistura com lama de mármore causa os maiores impactos dos 4 resíduos na maioria das categorias.
Hackenhaar *et al*., 2019 - Brasil	Analisar premissas para propor sistema de reciclagem e tratamento de RCD.	Revisão bibliográfica	-	Demanda por adaptação dos dados para o cenário brasileiro. Os autores considerame um sistema integrado a melhor estratégia.

Jalaei, Zoghi e Khoshand, 2019	Resíduos de construção, manutenção e demolição para análise da interoperabilidade entre ferramenta ACV e BIM para cálculo de RCD.	Athena (ferramenta de integração entre BIM e ACV).	Quantitade de resíduo gerada pelo ciclo de vida de um edifício	Uso da ferramenta BIM pode reduzir os resíduos gerados ao longo do ciclo de vida dos edifícios, assim como os impactos ambientais, especialmente emissões de CO2. Nas 3 fases, foi comparada a geração de resíduos utilizando BIM e não utilizando. Os resultados de geração de resíduo são sempre menores com o uso da ferramenta BIM.
Rosado *et al*., 2019 - Brasil	Gestão de RCD em 8 cenários.	SimaPro 8.0.2. CML E Impact 2002. Ecoinvent v.3.1.	10 000 T em 15303 m² de área e 62 municípios	A principal contribuição para a toxicidade humana são os processos de transportes por caminhões. A reciclagem é o processo que causa os maiores impactos, especialmente a reciclagem do aço. Ao mesmo tempo, os autores afirmam que a reciclagem do aço é imprescindível. Os resíduos de papelão representam menos de 5% do volume de RCD mas contribuem com 33 e 67% do aquecimento global nos diferentes métodos de cálculo.
Rosado e Penteado, 2019 - Brasil	Comparação de sistema de gestão de RCD municipal atual com outro que utiliza 70% de reciclagem.	SimaPro 8.2.0. CML 2000. Ecoinvent v.3.01. EU & DK Input Output US LCI.	1 T de RCC	Redução de 22% dos impactos ambientais. Devido às grandes distâncias, alguns municípios não obtiveram benefícios ambientais com a reciclagem. A disposição final em aterro sanitário contribui com 68% dos impactos, e os transportes com 20%.
Hasan, Whyte e Jassmi, 2020 - Emirados Árabes	Extração da matéria-prima, processamento, produção, construção, manutenção e reabilitação para construção de rodovia utilizando RCD.	SimaPro 5.8.2. ReCiPe. Ecoinvent 3.3 e revisão bibliográfica.	3,5 km rodovia com 30 anos de vida útil	A extração das matérias-primas e seu processamento representam os maiores impactos na maioria dos cenários, seguidos por processo construtivo e transportes para a categoria de mudanças climáticas. O cenário usual causa os maiores impactos em todas as categorias. Os cenários que utilizam de materiais alternativos apresentam os maiores ganhos nas categorias de depleção de recursos fósseis, aquecimento global, radiação ionizante e uso do solo, respectivamente.

Singhal e Pandey 2020 - Índia	Coleta e tratamento do resíduo comparando aterro e reciclagem como alternativas de gestão de RCD.	SimaPro 8.5. ReCiPe 2016. Ecoinvent 3.4.	1 T RCD	A reciclagem representa menores impactos devido à recuperação de material. Consumo de energia mais limpa reduziu emissões de carbono mas aumentou depleção de recursos minerais e eutrofização, o que vincula a reciclagem ao consumo excessivo de energia. Os impactos ambientais da reciclagem diminuem conforme os transportes são evitados.
Kvocka *et al*., 2020 - Europa	Produção de revestimento pré-fabricado de fachadas de geopolímeros com RCD, incluindo construção, uso, demolição e reuso em rodovias.	GaBi. Ecoinvent.	1 m² painel	O processo produtivo é a etapa que causa os maiores impactos, seguido pelo processo construtivo. O consumo de energia representa altos impactos devido a geração por usinas térmicas. Vidro, mármore e alumínio são os materiais que causam os maiores impactos ambientais, devido à extração das matérias-primas e produção.
Zulcão *et al*., 2020 - Brasil	Da extração das matérias-primas até o ponto de reaproveitamento do resíduo do processamento de pedras ornamentais para a produção de materiais cimentícios em diferentes misturas.	SimaPro 8.4. Ecoinvent 3.3.	1 kg e 1m³ RCD	Secagem artificial aumenta os impactos significativamente. O reaproveitamento do material resulta em menores impactos ambientais em todas as misturas. O reaproveitamento melhora a resistência a compressão em 20% com substituição de até 5%. Com substituições de 25 a 40%, as perdas de desempenho ainda podem compensar os ganhos ambientais. Para o uso em argamassas e concretos de alto desempenho, os ganhos ambientais não compensam a perda de resistência.
Meek *et al*., 2021 - Austrália	Extração da matéria-prima, transportes, processamento, construção, uso, manutenção, fim-de-vida	OpenLCA v.1.7.2. AusLCI v2.8. Ecoinvent v3.4.	1 kg caulim	Os resultados para potenciais de aquecimento global mostraram que o reaproveitamento do resíduo é 15% menor do que o usual.

Tabela 1 – Levantamento das principais informações doS artigos revisados

Fonte: Elaborado pela autora.

3 | DISCUSSÃO

De modo geral, percebe-se que a maioria dos ICVs para a avaliação de impactos de sistemas de gestão de RCDs, incluem processos como:

- coleta na fonte de geração (obra);
- transportes;
- instalações de triagem;
- instalações de reciclagem, podendo incluir limpeza, moagem, trituração, peneiramento;
- reuso;
- incineração;
- aterro sanitário.

A partir desses processos, pôde-se perceber diversas variações de cenários, e com isso, algumas conclusões:

- transportes representam os processos com os impactos ambientais mais representativos [3, 5, 11, 15];
- reciclagem não pode ser considerada benéfica em todos os casos [3, 7, 11, 16];
- reciclagem tende a ser benéfica quando o resíduo for separado em obra, eliminando transportes para instalações de triagem [3, 8, 11, 16];
- reciclagem tem potencial de evitar o uso de aterros e a extração de recursos naturais [16, 20];
- a descentralização de usinas de reciclagem pode ser uma boa solução para a redução dos impactos ambientais causados pelos transportes.

Dentre as diversas categorias de impacto analisadas, pôde-se perceber que a maioria dos estudos analisam o impacto ambiental dos RCD a partir da categoria de impacto de aquecimento global ou mudanças climáticas, assim como emissões de CO_2, e isso é perceptível em estudos de muitas áreas. Entretanto, pode-se perceber que toxicidade e eutrofização da água, diretamente relacionadas com a lixiviação do resíduo quando depositado em aterro, podem ser categorias de impacto importantes a serem analisadas. Além disto, categorias de impacto tais como emissões de GEE (gases de efeito estufa), ou ainda toxicidade humana e agentes inorgânicos respiratórios, também tendem a apresentar resultados bastante significativos, considerando-se as emissões causadas pelos transportes e, também, a poluição gerada por aterros sanitários, especialmente, ao se tratar de resíduos.

O SimaPro é software mais utilizado. Ainda assim, GaBi e OpenLCA também são referência. Em relação aos métodos de cálculo, CML, ILCD, Ecoindicator e ReCiPe foram os que mais apareceram. No que se refere à base dados, Ecoinvent foi a mais utilizada. A partir disto, tais referências se demonstram válidas para futuras pesquisas.

Por fim, pôde-se perceber que, dos 19 artigos levantados, cinco são de origem brasileira (aproximadamente 27%), o que demonstra preocupação nacional com o

impacto ambiental do reaproveitamento de RCDs e o desenvolvimento de pesquisas brasieleiras presentes em âmbito mundial.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se claramente a pertinência do desenvolvimento de pesquisas na área para a promoção de maior eficiência e otimização de recursos no setor da cosntrução civil, assim como, a mitigação dos impactos em categorias consideradas mais representativas.

A elaboração de ACV ligada, especificamente, ao reaproveitamento dos RCDs, permite compreender a real validade do uso de RCD para a produção de novos materiais de construção. Entretanto, nesses casos, vale lembrar que para que essa produção seja aplicável na prática, a maioria dos estudos deve ser acompanhada por análises físicas e químicas, afinal, a substituição de matérias-primas brutas por resíduos somente é viável se puderem ser garantidas as propriedades mecânicas desses novos materiais.

Considerando a grande incidência de discussões acerca do impacto ambiental gerado pelos transportes, é possível vislumbrar que, uma vez encontradas e implantadas soluções para mitigar os impactos provocados pelos transportes, os demais impactos ligados à gestão dos resíduos se tornarão salientes, para os quais deverão, também, ser encontradas soluções.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que permitiram a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Acesso em: 4 jun. 2021. Disponível em: https://abrelpe.org.br/panorama-2020/.

2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Versão Corrigida: 2014.

3. MERCANTE, Irma T. et al. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 232-241, 2012. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0350-2.

4. SUDARNO; PURWANTO; PRATIKSO. Life Cycle Assessment on Cement Treated Recycling Base (CTRB) Construction. **Waste Tech**, v. 1, n. 1, p. 6-11, 2013. http://dx.doi.org/10.12777/wastech.2.2.2014.6-11.

5. BUTERA, Stefania; CHRISTENSEN, Thomas H.; ASTRUP, Thomas F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 44, p. 196-205, out. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.011.

6. BOVEA, M. D.; POWELL, J. C. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. **Waste Management**, v. 50, p. 151-172, abr. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.036.

7. KUCUKVAR, Murat; EGILMEZ, Gokhan; TATARI, Omer. Life Cycle Assessment and Optimization-Based Decision Analysis of Construction Waste Recycling for a LEED-Certified University Building. **Sustainability**, v. 8, 13p., 18 jan. 2016. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su8010089.

8. PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano; ROSADO, Laís Peixoto. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: a case study in brazil. **Waste Management & Research**: The Journal for a Sustainable Circular Economy, v. 34, n. 10, p. 1026-1035, 28 jul. 2016. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/0734242x16657605.

9. YAHYA, Khairulzan; BOUSSABAINE, Halim; ALZAED, Ali Nasser. Using life cycle assessment for estimating environmental impacts and eco-costs from the metal waste in the construction industry. **Management Of Environmental Quality**: An International Journal, [S.L.], v. 27, n. 2, p. 227-244, 14 mar. 2016. Emerald. http://dx.doi.org/10.1108/meq-09-2014-0137.

10. BIZCOCHO, Nuria; LLATAS, Carmen. Inclusion of prevention scenarios in LCA of construction waste management. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 3, p. 468-484, 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-018-1462-8.

11. BORGHI, Giulia; PANTINI, Sara; RIGAMONTI, Lucia. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). **Journal f Cleaner Production**, v. 184, p. 815-825, maio 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.287.

12. COLANGELO, Francesco et al. Life Cycle Assessment (LCA) of Different Kinds of Concrete Containing Waste for Sustainable Construction. **Buildings**, v. 8, n. 5, 12p., 11 maio 2018. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/buildings8050070.

13. HACKENHAAR, I. C. et al. Life Cycle Assessment applied to construction and demolition waste treatment: proposal of a brazilian scenario. **Iop Conference Series**: Earth and Environmental Science, v. 323, 9p. 6 set. 2019. IOP Publishing. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012054.

14. JALAEI, Farzad; ZOGHI, Milad; KHOSHAND, Afshin. Life cycle environmental impact assessment to manage and optimize construction waste using Building Information Modeling (BIM). **International Journal of Construction Management**, 18p., 28 mar. 2019. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/15623599.2019.1583850.

15. ROSADO, Laís Peixoto et al. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil**. Waste Management**, v. 85, p. 477-489, fev. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011.

16. ROSADO, Laís Peixoto; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Avaliação do ciclo de vida do Sistema Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil da Região Metropolitana de Campinas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 71-82, fev. 2019. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019179604.

17. HASAN, Umair; WHYTE, Andrew; JASSMI, Hamad Al. Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, 16p., jun. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120531.

18. JAIN, Sourabh; SINGHAL, Shaleen; PANDEY, Suneel. Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: a case of urban india. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, 12p., abr. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104642.

19. KVOčKA, Davor et al. Life Cycle Assessment of Prefabricated Geopolymeric Façade Cladding Panels Made from Large Fractions of Recycled Construction and Demolition Waste. **Materials**, v. 13, n. 18, 16p., 5 set. 2020. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma13183931.

20. ZULCÃO, Robson et al. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, 14p., out. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119523.

21. MEEK, Alexandra H. et al. Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 267, 43p., jan. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120997.



PEGADA DE CARBONO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS PRODUZIDOS COM FINOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081149

FERREIRA; LUIZA DE SOUZA[1]; DESSUY; THAINÁ YASMIN[1]; GLITZEHNIRN; CLAUDIA[1]; PASSUELLO; ANA[1]; MASUERO; ANGELA BORGES[1]
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS).
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: LUIZA.FERREIRA@HOTMAIL.COM

RESUMO: A construção civil é considerada a indústria que mais consome recursos naturais e que mais gera resíduos. Uma solução para reduzir esse processo é incorporar resíduos da construção civil (RCC) como agregado no concreto. O presente artigo tem como objetivo analisar a pegada de carbono de concretos autoadensáveis produzidos com finos de RCC, que são substitutos parciais do agregado miúdo natural, para fins de determinação do perfil ambiental de diferentes traços. Como resultado, pode-se perceber que o cimento é o principal material responsável pelo impacto ambiental gerado pelos concretos autoadensáveis analisados.

PALAVRAS-CHAVES: ACV; RCC; Sustentabilidade

ABSTRACT: Civil construction is considered the industry that consumes more natural resources and generates more waste. One solution to reduce this process is incorporating civil construction and demolition waste (CWD) as recycled aggregate in concrete. This paper aims to analyze the carbon footprint of self-compacting concrete produced with CWD fines, which are partially substituted for the natural fine aggregate. As a result, it was shown that cement is the main material source of ambiental impact generated by the self-compatcing concrete analyzed.

KEYWORDS: LCA, CWD, Sustainability

1 | INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por 40% das emissões de gases do efeito estufa (GURSEL et. al, 2014), além de utilizar cerca de 50% dos recursos naturais extraídos mundialmente (UNEP, 2019) e ser responsável pela geração de 30% a 40% dos resíduos sólidos urbanos gerados nos países (AKHTAR e SARMAH, 2018). Os resíduos provindos da indústria da construção civil são resíduos inertes constituídos de concreto, tijolo, argamassa, cerâmica, metal, plástico, madeira e vidro (ZHENG *et al*., 2017), os quais são resultados da ausência de gestão do processo construtivos ou de demolições ocorridas nas edificações (MENEGAKI e DOMINGOS, 2018). Muitas vezes, devido à inexistência de um plano de gerenciamento, os resíduos da construção civil são dispostos inadequadamente na natureza, gerando impacto ambiental ao poluírem o solo, danificar paisagens e proporcionar ameaças à saúde pública (SILVA; BRITO; DHIR, 2014; MENEGAKI; DOMINGOS, 2018; WANG et al., 2018).

Uma das alternativas mais promissoras para as problemáticas de exploração dos recursos naturais e geração de resíduos da construção, é inserir os resíduos como agregado reciclado em concretos, já que esse material é o mais utilizado na indústria da construção, além de ser considerado um dos que mais consome recursos naturais e que gera grande quantidade de resíduos devido sua demolição (WANG et al., 2017). Ao longo do ciclo de vida dos materiais, qualquer produto, ou material à vir a se tornar um produto, podem gerar impactos ambientais, logo, é de suma importância a seleção de materiais que seguem critérios ambientais (AGOPYAN; JOHN, 2011). Consequentemente, estudar a viabilidade ambiental de materiais alternativos pela quantificação de seus impactos na natureza, é de suma importância para atingir a sustentabilidade, reduzindo o consumo de matérias primas não renováveis e redução de emissões para recursos hídricos, solo e ar (ROCHA, 2020).

Neste contexto, uma das principais técnicas de mensuração dos impactos ambientais gerados pelos processos construtivos e seus insumos ou produtos é através da avaliação do ciclo de vida (ACV) (KURDA et al., 2019). Segundo a ISO 14.044 (2009), a avaliação do ciclo de vida é definida pela "compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 2). A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta que tem como objetivo realizar a gestão ambiental dos produtos ou insumos, analisando seus critérios ambientais mensuráveis, em termos de desempenho ambiental, ao longo de seu ciclo de vida, sendo considerada uma técnica coerente para a avaliar impactos de novos materiais, ou já existentes, na indústria da construção civil (KURDA et al., 2019).

Dessa forma, o presente artigo se justifica ao realizar a análise da pegada de carbono de três tipos diferentes de finos reciclados inseridos ao concreto auto-adensável: concreto, argamassa e cerâmica, através do cálculo de pegada de carbono. Esse entendimento é relevante ao permitir avaliar o ciclo completo de vida desses insumos do berço ao túmulo, ou até mesmo do berço ao berço com o reaproveitamento dos resíduos gerados pela própria indústria da construção.

2 | METODOLOGIA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é eleborada em quatro itens, sendo eles a determinação do objetivo e escopo, o Inventário do ciclo de vida, a avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e a análise dos resultados, conforme especificado na ISO 14040 (1997). Assim, para a determinação da pegada de carbono, utilizou-se da mesma metodologia.

2.1 Objetivo e escopo

O objetivo do presente trabalho é a definição do perfil ambiental de concretos confeccionados em laboratório com a substituição de seus finos convencionais por três distintos finos, de concreto, argamassa e cerâmica, a partir do cálculo da pegada de carbono em cada um dos traços. O beneficiamento dos finos, bem como sua origem, está descrito em SANTOS (2018). As distâncias de transporte não serão consideradas, como limitação de estudo. Determinou-se um metro cúbico ($1m^3$) de material confeccionado de concreto como unidade funcional para o referido trabalho, visto que

esta é considerada padrão para a comercialização deste material.

2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

O Inventário do ciclo de vida (ICV) foi realizado a partir de dados primários, com a quantificação e proporcionamento dos materiais, representados na Tabela 1. Os dados foram obtidos através de um estudo anterior realizado, o qual está descrito em SANTOS (2018). Nesta tabela, encontram-se os dados referentes a quatro traços de concreto, com substituição da areia fina por três diferentes finos em estudo. Os dados secundários foram obtidos a partir do banco de dados *Ecoinvent* 3.7.1.

O presente trabalho limitou-se a avaliar os traços desconsiderando o beneficiamento dos finos de concreto, argamassa e cerâmica, bem como as distâncias de transporte. Ressalta-se que, ainda que não considerados neste estudo, estes fatores devem ser avaliados para a verificação da melhor forma de gestão dos mesmos para permitir a correta escolha entre os traços analisados.

Concreto	Finos	Cimento (kg)	Areia (kg)	Finos (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
CAA 2.5	Concreto	620,700	493,919	80,458	977,612	48,610
	Argamassa	637,450	507,267	82,397	959,382	46,169
	Cerâmica	634,190	504,673	81,976	954,476	45,464
CAA 4	Concreto	451,100	679,099	124,862	1014,995	39,467
	Argamassa	442,090	655,558	108,109	950,522	43,564
	Cerâmica	436,740	657,504	106,801	939,019	44,881
CAA 5.5	Concreto	344,700	763,504	124,027	1008,210	36,254
	Argamassa	328,720	728,100	118,275	918,666	47,066
	Cerâmica	315,140	698,021	113,389	880,714	52,402
CAA 7	Concreto	270,800	792,063	128,657	974,880	45,371
	Argamassa	260,680	762,466	123,856	896,744	52,842
	Cerâmica	256,370	749,860	121,808	881,917	52,474

Tabela 1 – Inventário do ciclo de vida.

2.3 Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV)

O presente estudo utilizou-se do método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2013 GWP 100a, disponível no banco de dados *Ecoinvent* 3.7.1, para a verificação

da pegada de carbono associada aos diferentes traços de concreto auto-adensável analisados.

2.4 Análise dos resultados

Para interpretar os resultados da ACV, foram considerados os valores calculados de pegada de carbono de doze traços de concretos auto-adensáveis utilizando finos de resíduos da construção civil (concreto, argamassa e cerâmica). Para a realização dos cálculos, foram utilizados os seguintes valores em kg.CO2/UR de referência: cimento (0,83746m³), areia (0,00470m³), brita (0,00500m³) e água (0,00067m³).

3 | RESULTADOS

Os resultados de pegada de carbono encontrados para os doze traços de concretos auto-adensáveis estão representados na Tabela 2.

	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Total (kg.CO2/m³)
CAA 2.5 Finos Concreto	519,811	2,322	4,889	0,032	**527,054**
CAA 4 Finos Concreto	377,778	3,192	5,075	0,026	**386,072**
CAA 5.5 Finos Concreto	288,672	3,589	5,042	0,024	**297,327**
CAA 7 Finos Concreto	226,784	3,723	4,875	0,030	**235,412**
CAA 2.5 Finos Argamassa	533,839	2,384	4,797	0,031	**541,051**
CAA 4 Finos Argamassa	370,233	3,128	4,753	0,029	**378,143**
CAA 5.5 Finos Argamassa	275,290	3,422	4,594	0,031	**283,337**
CAA 7 Finos Argamassa	218,309	3,584	4,484	0,035	**226,412**
CAA 2.5 Finos Cerâmica	531,109	2,372	4,773	0,030	**538,284**
CAA 4 Finos Cerâmica	365,752	3,091	4,696	0,030	**373,568**
CAA 5.5 Finos Cerâmica	263,917	3,281	4,404	0,035	**271,637**
CAA 7 Finos Cerâmica	214,700	3,525	4,410	0,035	**222,669**

Tabela 2 – Pegadas de carbono para os diferentes traços de concreto.

Na Figura 1, estão representados os doze traços de concreto analisados no presente estudo. Os traços são compostos por quatro materiais: cimento, areia, brita e água. O impacto dos finos, presentes no inventário (Tabela 1), foi determinado como nulo por tratarem-se de resíduos. Os valores demonstrados na Figura 1 são o resultado do produto do consumo de kg/m³ de cada material presente nos concretos (Tabela 1) pela pegada de carbono (kg.CO2/m³) referente aos materiais deste estudo (Tabela 2). As colunas da Figura 1 demonstram os resultados da pegada de carbono individual em cada um dos traços.

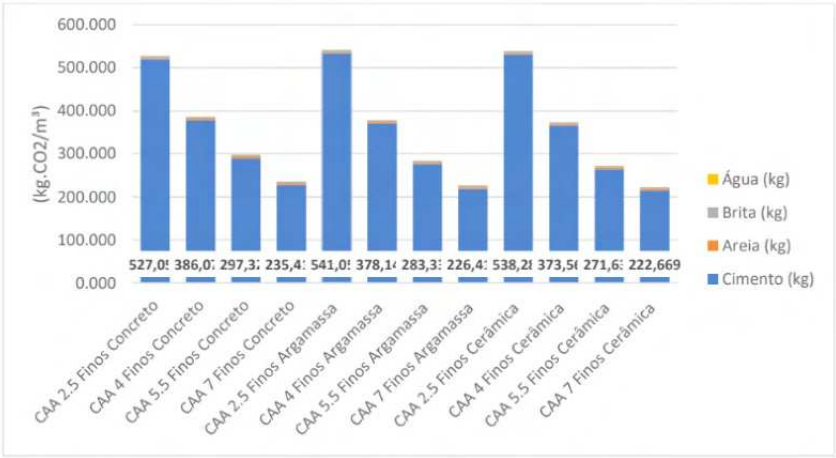


Figura 1 – Comparação entre as diferentes pegadas de carbono nos traços de concreto.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, conforme figura 1, em todos os traços, a contribuição do cimento foi superior a 95% da pegada de carbono total, evidenciando que este material é o principal responsável pelo impacto na categoria de mudanças climáticas. Os demais materiais são responsáveis por uma fração mínima, porém não irrelevante, do impacto total.

Ainda que este estudo limitou-se a analisar o beneficiamento dos finos e o transporte, estudos anteriores (WASKOW et al., 2021) demonstram que a distância de transporte é um fator essencial na escolha de agregados, sendo os impactos de GWP dos agregados reciclados inferiores aos naturais quando as distâncias de transporte são entre 50 e 150km inferiores à origem do agregado natural, de forma que, ao tratar de maiores distâncias, a diferença entre os impactos de GWP causados pelo transporte dos agregados reciclados e naturais torna-se pouco significativa.

4 | CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a pegada de carbono, com base no método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2013 GWP 100a, associada à produção de concretos auto-adensáveis. Da análise realizada, constatou-se que o concreto CAA 7 apresentou, nos três casos (com finos de concreto, de argamassa e de cerâmica), a menor pegada de carbono em comparação com os demais concretos. Entende-se que, nestes casos, o fator responsável pela redução da pegada de carbono foi o proporcionamento do traço, que reduziu a quantidade de cimento no concreto. Nota-se uma redução gradual, em cada um dos traços, ao passo em que o cimento é reduzido em cada um dos traços analisados.

Em um futuro estudo, uma avaliação detalhada do ciclo de vida deve ser realizada, considerando as demais categorias de impacto e processos não considerados neste

estudo, como o beneficiamento dos finos. Essa futura análise pode gerar diferentes resultados, capazes de auxiliar em novas diretrizes de tomadas de decisão com vistas à redução dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

1. AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. Vol. 5. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

2. AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 10 jun. 2018.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040.** Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

4. GURSEL, P. et al. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 38–48, ago. 2014.

5. KURDA, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 139, p. 407–417, 2019.

6. MENEGAKI, M., & Damingos, D. A review on the current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 8-15, 2018.

7. SANTOS, I. L. **Uso de finos de resíduos de construção e demolição em concreto autoadensável**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

8. ROCHA, D. P. B. Da. **Avaliação do ciclo de vida de agregados leves artificiais produzidos com resíduo industrial e argila vermelha local (Nordeste/Brasil).** 2020. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

9. SILVA, R. V., BRITO, J. De., DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction. **Construction and Building Materials**. 2014, 201–217.

10. UNEP. Waste to Energy – Considerations for informed decision making. **United Nations Environment Programme**, 2019.

11. WANG, J. et al. Combining Life Cycle Assessment and Building Information Modelling to account for carbon emissions from building demolition waste: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3154 – 3166, 20 jan. 2018.

12. WASKOW, R. et al. Environmental performance of construction and demolition waste management strategies for valorization of recycled coarse aggregate. **Journal of Environmental Management**, v. 295, p. 113094, 1 out. 2021.

13. ZHENG, L. et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 405 – 413, 1 abr. 2017.



AVALIAÇÃO DOS PARAMETROS SUSTENTÁVEIS PARA PAVERS CONFECCIONADOS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081160

ALTOÉ; SILVIA PAULA SOSSAI[1]; GOÉS; ISADORA[1]; ROTTA; JOSÉ VENANCIO PINHEIRO[1]; BORIN; MATEUS ROBERTO[2]
[1]UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ; [2]UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS APUCARANA.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: SPSALTOE@UEM.BR

RESUMO: A utilização de resíduos como matéria prima para a Indústria da Construção Civil ganha cada vez mais notoriedade. Porém, para avaliar a viabilidade desta utilização devem ser realizadas análises mais apuradas quanto a sua real contribuição frente a parâmetros de sustentabilidade. O objetivo do presente trabalho é avaliar esses parâmetros para pavers produzidos com resíduos de pneus e cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Foram analisados aspectos como: redução no consumo de recursos naturais, neutralização de contaminantes, emissão de CO_2 e custos. Os resultados demonstram que a utilização dos resíduos propostos atendem os parametros sustentáveis avaliados dentro da utilização proposta.

PALAVRAS-CHAVES: Reciclagem; sustentabilidade; cinza do bagaço de cana-de-açúcar e pneu.

ABSTRACT: The use of waste as a raw material for the Civil Construction Industry is gaining more and more notoriety. However, to assess the feasibility of this use, more accurate analyzes should be carried out regarding its real contribution to sustainability parameters. The objective of this work is to evaluate these parameters for pavers produced with waste tires and sugarcane bagasse ash. Aspects such as: reduction in the consumption of natural resources, neutralization of contaminants, CO_2 emissions and costs were analyzed. The results demonstrate that the use of the proposed waste meets the sustainable parameters evaluated within the proposed use.

KEYWORDS: Recycling; sustainability; sugar cane bagasse ash and tire.

1 | INTRODUÇÃO

A crise energética, consumo indiscriminado de recursos naturais e a intensa geração e acúmulo de resíduos têm levado a grandes discussões sobre o impacto ambiental sofrido ao longo dos anos, e quais as consequências e resultados disto a longo prazo. O que de certa forma tem incentivado uma busca incessante por ações estratégicas que diminuam a degradação e o desequilíbrio causados no meio ambiente (TAVARES, 2010) (1).

Reciclagem de resíduos, utilização de materiais sustentáveis, economizar água e energia, potencializar a durabilidade, planejar a manutenção, assegurar segurança e higiene, redução dos custos, redução na produção de resíduos e reciclagem de resíduos,

são apontados por Teodoro (2011)[3] como pilares para uma construção sustentável.

Atualmente, a temática da construção sustentável, se conduz em duas direções: Os centros de pesquisa em tecnologias alternativas buscam o resgate de materiais e tecnologias nacionais como o uso de materiais naturais e pouco processados e são organizados em comunidades alternativas. E de outro lado, empresários apostam em "empreendimentos verdes" com as certificações, tanto no âmbito da edificação quanto no âmbito do urbano (MMA, 2016) [4].

Estabelecer regras sobre materiais serem mais ou menos sustentáveis é uma tarefa delicada, já que envolve oscilações de acordo com o método escolhido para ser feita tal analogia. Ainda que parte de alguns aspectos ambientais estejam cada vez mais acessíveis a sociedade, existe o perigo de serem inventados mitos por equívocos de interpretações e mudanças de dados, gerados por espaços incompletos por falta de um plano geral, que deve abranger todos os aspectos do material, afetando a veracidade da analogia (LEEUW, 2005)[5].

O presente trabalho tem como objetivo avaliar parâmetros de sustentabilidade de um ecomaterial desenvolvido por Altoé (2017)[6], este produto se constitui de pavers produzidos com resíduos de pneus e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em substituição ao agregado natural miúdo, a areia. Os resultados obtidos pela pesquisadora apresentaram propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos pavers convencionais. A porcentagem de substituição foi de 27% de agregado natural por agregado reciclado, sendo 25% de CBC e 2% de pneu. Para isto foram analisados aspectos como: redução no consumo de recursos naturais, neutralização de possíveis contaminantes dos resíduos quando incorporados à matriz cimentícia, emissão de CO_2 e custos dos produtos.

2 | PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais: Caraterização do Material

A Tabela 01 traz as características do bloco de concreto para pavimentação a ser avaliado:

Dimensões	Comprimento		Largura		Altura	
	190mm		90mm		80mm	
Traço (Kg)	Cimento	Areia	Brita	CBC	Pneu	Água
	1,00	1,95	1,35	0,66	0,04	0,42
Propriedades	Resist. Mecânica		Absorção		Abrasão	
	32,22 Mpa		5,23%		6,32 mm	

Tabela 01 – Características do Paver

Altoé (2017)[6] estudou combinações entre Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC) e resíduo de pneus em diferentes teores até obter um produto que apresentasse resultados semelhantes ao paver referência, sem utilização de resíduos na composição, foram avaliadas a resistência à compressão, a absorção de água e o índice de desgaste

por abrasão. O teor ótimo de substituição estabelecido foi de 27%, sendo 25% de CBC e 2% de pneu.

2.2 Métodos: Parâmetros de sustentabilidade

2.2.1 Redução no consumo de recursos naturais

Este parâmetro foi avaliado pela comparação do consumo de materiais para a confecção do traço com e sem resíduos, em valores absolutos, para a fabricação de 1 m3 de concreto.

2.2.2 Neutralização dos metais potencialmente contaminantes presentes nos resíduos

A presença de contaminantes, tanto nos resíduos quanto no produto final desenvolvido, foi determinada através de ensaios de lixiviação e solubilização dos mesmos. O procedimento utilizado na obtenção do extrato lixiviado seguiu a NBR 10005:2004 (ABNT:2004)[7], assim como o procedimento da extração do solubilizado seguiu a 10006:2004 (ABNT:2004)[8]. Sendo que, as amostras de lixiviado e solubilizado foram submetidas a determinação dos teores de contaminantes listados segundo os anexos F e G da NBR 10004:2004 (ABNT:2004)[9], por meio de Espectrômetro de Absorção Atômica (EAA) 52 Varian - SPECTRAA-240FS e Cromatógrafo de íons, Metrohm – 850 Professional IC.

2.2.3 Emissão de CO_2

A emissão de CO_2 foi obtida em um estudo baseado no método desenvolvido por Costa (2012)[10] denominado Método para a Quantificação das Emissões de CO_2 (Método QE- CO_2). O método possui três níveis de avaliação: básico, intermediário e avançado, para esta pesquisa foi adotado o método básico.

A fórmula geral do Método QE- CO_2, Equação 01, consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizado na obra pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte.

2.3 $Emissões_{MT1J} = QT_j \times FP \times (Emissões_{TR1,i} + Emissões_{EN1,i}$ (1)

$Emissões_{MT1,j}$ = emissões devido à utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO_2;

QT_j = quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas;

FP = fator de perda do produto j, adimensional, para concreto 6%;

$Emissões_{TR1,j}$ = emissões de devido ao consumo de energia i para o transporte de matérias primas e do produto j para a edificação, em toneladas / tonelada de produto j;

$Emissões_{EN1,j}$ = emissões devido ao consumo de energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas / tonelada de produto j.

2.3.1 Comparação de Custos

Este parâmetro foi avaliado pela comparação do custo dos materiais para a confecção do traço com e sem resíduos, em valores absolutos, para a fabricação de 1 m^3 de concreto.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Redução do consumo de recursos naturais

Com o teor ótimo de substituição encontrado por Altoé (2017)[5] tem-se uma redução de 27% no consumo de recursos naturais, ou seja, se para 1 m3 de concreto utilizado na fabricação de paver são consumidos aproximadamente 1100 kg de agregado miúdo ter-se-ia uma redução de 297 kg no processo de fabricação. Esta redução impacta diretamente na conservação e preservação dos recursos naturais, uma vez que com menos materiais utilizados por este tipo de indústria, a extração destes será reduzidza, garantindo, assim, que as próximas gerações também possam utilizar este recurso.

3.2 Neutralização dos metais potencialmente contaminantes presentes nos resíduos

A determinação da presença de materiais contaminantes nos resíduos é fundamental para a caracterização destes como perigosos ou não perigosos, inertes e não inerte, o que determina a sua destinação e também a sua forma de tratamento.

Os extratos lixiviados tanto da CBC quanto do resíduo de pneu não apresentaram parâmetros acima dos limites estabelecidos pela norma em seu F, sendo então classificados como um resíduo "NÃO PERIGOSO". Porém, o extrato solubilizado dos resíduos apresentou índices em alguns metais acima do Anexo G, o que os faz serem classificados dentro da classe dos não-inertes. Dessa forma, de acordo com a NBR 10004, todas as amostras do Resíduo de Pneus Inservíveis e da CBC analisadas podem ser classificadas, pelos parâmetros ora apresentados, como "Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte". Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A Tabela 02 traz os metais cujos parâmetros exigidos foi excedido.

Parâmetros Solubilizado	Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004 (Anexo G)	Concentração Residuo de Pneu (mg/l)	Concentração CBC (mg/l)
Alumínio	0,20	3,22300	2,00500
Cádmio	0,006	0,0013	0,00750
Chumbo	0,01	0,14265	0,14590
Mercúrio	0,001	0,00200	Nd

Tabela 2 - Concentração de ânions no extrato solubilizado acima dos parâmetros

Esta classificação indica que pode ocorrer algum tipo de contaminação tanto

do solo quanto da água caso os resíduos analisados sejam descartados de forma inadequada no meio ambiente. Para verificar se os contaminantes foram encapsulados pelo concreto foram realizados também os ensaios de solubilização e lixiviação nos pavers, buscando confirmar a eficiência da aplicação. Os resultados são apresentados na Tabela 03, e mostram que os metais analisados passaram a não apresentar mais concentrações que o classificasse o material como não-inerte.

Parâmetros	Limite Máximo ANBT NBR 10004:2004 (Anexo G)	Concentração Pavers referência (mg/l)	Concentração Pavers com resíduos (mg/l)
Alumínio	0,20	0,15	0,13
Cádmio	0,006	0,005	0,005
Chumbo	0,01	0,008	0,006
Mercurio	0,001	Nd	Nd

Tabela 3 - Concentração de ânions no extrato solubilizado – Pavers

Conner (1990)[11] e Wiles (1987) [12] estudaram o tratamento de resíduos sólidos industriais perigosos com pozolanas, cinzas volantes e cimento, verificando os mecanismos de conversão química e retenção física dos contaminantes. De acordo com os autores a imobilização do íon cádmio (Cd2+) está relacionada à sua precipitação na matriz cimentícia, reagindo com o $Ca(OH)_2$, resultando na substituição dos íons Cd_2+ e gerando o $CdCa(OH)_4$. Bishop (1986) afirma que a imobilização do chumbo (Pb+2) em cimento deve-se a dois fenômenos: primeiro a precipitação do hidróxido metálico e depois a sua encapsulação na fase C-S-H. De acordo com Bradley e Hanna (1994), em pH alcalino (pH > 7), os cátions Al+3 precipitam na forma de hidróxidos insolúveis [$Al(OH)_3$].

Os mecanismos de precipitação e encapsulamento supracitados podem ser uma explicação para a diminuição da liberação desses metais no solubilizado dos pavers fabricados com os resíduos propostos. Os resultados indicaram claramente que esses metais estão sujeitos a um mecanismo de imobilização decorrente do processo de tratamento utilizado, contribuindo dessa forma para a redução de contaminação do ambiente com a disposição do resíduo da forma usualmente adotada.

3.3 Emissão de CO_2

Um outro ponto que pode ser alvo de estudo é a emissão de CO_2, ou seja, verificar se a substituição proposta pode também contribuir para a redução a emissão deste tipo de gás, além de representar um ganho energético e de créditos de carbono.

A Tabela 4 traz os valores de Emissões devido ao consumo de energia para o transporte das matérias-primas e os valores de Emissões devido ao consumo de energia para Extração e Processamento do material. Os valores assinalados são tabelados por Costa (2012)[9] e as distâncias foram consideradas do ponto de extração dos materiais até a cidade de Maringá.

MATERIAL	EMISSÃO CO_2 TRANSPORTE				EMISSÃO CO_2 PRODUÇÃO (*)	EMISSÃO TOTAL DE CO_2 (t/kg)
	DIST.(KM)	Cot. (*)	Feche (*)	TOTAL		
AGREG MIÚDO	370	0,0196	0,0032	0,0232064	0,0722	0,0954
AGREG. GRAUDO	25	0,0196	0,0032	0,001568	0,0719	0,0735
CIMENTO	1120	0,0196	0,0032	0,0702464	0,6281	0,6983
CINZA	20	0,0196	0,0032	0,0012544	-	0,0013
PNEU	10	0,0196	0,0032	0,0006272	0,615	0,6156

Cot. = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km, no caso adotado um caminhão de 12 a 26 t

Feche = fator de emissão corrigido da energia CO_2, em t / L

(*) = valores tabelados por Costa (2012)

Tabela 4 – Emissão de CO_2 dos materiais componentes

A Tabela 5 traz os valores de emissão obtidos para a fabricação de 1 m^3 de concreto, considerando o fato de perda de produto de 6% para concretos estabelecido pelo método.

MATERIAL	TRAÇO T0			TRAÇO TR		
	QTDADE (kg)	CO_2 (ton./ kg)	CO_2/MAT (ton./m3)	QTDADE (kg)	CO_2 (ton./ kg)	CO_2/MAT (ton./m3)
AGREG. MIÚDO	1092,50	0,0954	0,0063	797,525	0,0954	0,0045
AGREG. GRAUDO	655,50	0,0735	0,0029	655,50	0,0735	0,0029
CIMENTO	437,00	0,6983	0,0183	437,00	0,6983	0,0183
CINZA	0	0,0013	0	273,125	0,0013	0,0000
PNEU	0	0,6156	0	21,85	0,6156	0,0008
TOTAL (tCO_2/m3)			0,0275			0,0265

Tabela 5 – Cálculo da Emissão de CO_2 por m^3 de concreto

A substituição do agregado miúdo por resíduos de pneus e CBC promoveu uma redução de 3,7% da emissão de CO_2 em relação ao traço de referência.

3.4 Comparação de Custos

Para a análise do custo de materiais para a produção do concreto foram realizados levantamento de preços dos itens envolvidos e também o consumo de cada componente, conforme apresentado na Tabela 6. No custo da CBC foi considerado somente o valor de frete, não foi levado em consideração o valor do material, uma vez que este resíduo atualmente é tratado como resíduo sem valor comercial.

MATERIAL	TRAÇO T0			TRAÇO T		
	QTDADE (kg)	R$ UNIT	R$ TOTAL	QTDADE (kg)	R$ UNIT	R$ TOTAL
AGREG. MIÚDO	1092,50	0,052	56,81	797,53	0,052	41,47
AGREG. GRAUDO	655,50	0,046	30,15	655,50	0,046	30,15
CIMENTO	437,00	0,80	349,60	437,00	0,80	349,60
CINZA	0	0,015	0	273,13	0,015	4,10
PNEU	0	0,20	0	21,85	0,20	4,37
TOTAL (R$/m3)			436,56			429,70

Tabela 6 – Custos do Concreto (m3)

Do ponto de vista de custo, quando considerado o custo da CBC como zero, observa-se que a variação entre os custos totais de produção foi pequena, sendo reduzidos o percentual de 1,57%

4 | CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos o material se mostra eficiente frente aos parâmetros de sustentabilidade levantados, uma vez que a utilização dos resíduos gera uma redução de custo no produto final, além de reduzir de forma significativa a utilização de recursos naturais aplicados na fabricação tradicional. Fora isso, a utilização destes resíduos na forma de agregado para concreto para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação oferece uma forma adequada para disposição destes, uma vez que observa-se a partir dos ensaios de lixiviação e solubilização do concreto produzido, que os metais presentes nos resíduos foram neutralizados, com uma eficiência de neutralização de aproximadamente 100%, ficando dentro dos índices aceitáveis que tornam o concreto do paver um material não perigoso e inerte.

A redução na emissão de CO_2 é uma característica a ser ressaltada nesta pesquisa, o que contribui significativamente para a preservação ambiental, já que a emissão de gases poluentes é um fator de grande impacto nas soluções ambientais. Desta forma, pode-se afirmar que o ecomaterial estudado tem grande potencial do ponto de vista sustentável.

REFERÊNCIAS

1. TAVARES, Priscila de Oliveira. **Aplicação do conceito de sustentabilidade em construções residenciais**,2010. Disponível: http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg2/59.pdf Acesso: 15/02/2020.

2. JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

3. TEODORO, Nuno Filipe Godinho. **Contribuição para a Sustentabilidade na Construção Civil: Reciclagem e Reutilização de Materiais**. 2011. Dissertação (mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011.

4. BRASIL. **MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA**). http://www.mma.gov.br, 2016.

5. LEEUW,B. **The World Behind the Product**. Journal Of Industrial Ecology,2005. Disponível em:http://www.oitbrasil.org.br/sites/default/files/topic/green_job/doc/construcoes_sustentaveis_orientador_106.pdf. Acesso:06/02/2020

6. ALTOE, S. P. S. **Resíduos de pneus e da queima do bagaço da cana-de-açucar na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers).** 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.2017.

7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos Rio de Janeiro, 2004.

8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004** Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

10. COSTA, B, L, C. **Quantificação das emissões deCO_2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

11. CONNER, J.R. **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes**. New York. Van Nostrand Reinhold, 1990.

12. WILES, C. C. A review of solidification/stabilization technology. In: **Journal of Hazardous Materials**. V. 14, p. 5-21. 1987.

Contatos

Endereço:
Av. Osvaldo Aranha, 99 - Prédio Castelinho, CEP: 90035-190. Porto Alegre-RS.

Telefone:
(51) 3308-3518

E-mail da comissão organizadora:
enarc2021@gmail.com

E-mail do comitê científico:
enarc.ccientifico2021@gmail.com

Site:
https://www.ufrgs.br/enarc2021

Instagram:
https://www.instagram.com/enarc2021/

Facebook:
https://www.facebook.com/enarc2021/

