ENARC
FOZ DO IGUAÇU-2023

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Influence of substitution of natural aggregates by recycled concrete grade aggregates on the mechanical properties of concrete

Iana Ingrid Rocha Damasceno
Universidade de Brasília | Brasília, Distrito Federal | iana.damasceno@gmail.com

Layse Rafaele Furtado Lima
Universidade Federal do Pará | Tucuruí, Pará | layserafaele@gmail.com

Rodrigo Fernandes Moraes
Universidade Federal do Pará | Belém, Pará | rfernandesmoraes2015@gmail.com

Maurício de Pina Ferreira
Universidade Federal do Pará | Belém, Pará | mpinaf@gmail.com

Marcos Honorato de Oliveira
Universidade de Brasília | Brasília, Distrito Federal | honorato.eng@gmail.com

Resumo

Este trabalho tem por objetivo analisar a utilização de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) em substituições maiores que a recomendada pela norma brasileira e com resistência característica controlada do material de origem, verificando essa influência nas propriedades mecânicas do concreto reciclado. Com isso, foram coletadas amostras de corpos de prova com resistência característica conhecidas em uma faixa de 25 a 35 MPa e, posteriormente, foi realizado o beneficiamento desses. Em seguida, utilizando o método do IPT/EPUSP, foram executadas três dosagens com substituições distintas de agregado graúdo natural (AGN) por AGRCO: 0%, 30% e 100%. Por fim, foram executados os ensaios de compressão, tração por compressão diametral, tração na flexão e análise pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Dessa forma, foi observado que o traço com 30% de AGRCO apresentou resultados satisfatórios, permanecendo na mesma classe de resistência do concreto referência, sendo viável para uso em concretos estruturais.

Palavras-chave: Concreto; Agregado graúdo reciclado de concreto; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the use of coarse recycled concrete aggregates (AGRC) in replacements greater than that recommended by the Brazilian standard and with controlled characteristic strength of the original material, verifying this influence on the mechanical properties of recycled concrete. With this, samples of specimens with known characteristic resistance were collected in a range of 25 to 35 MPa and, subsequently, these were processed. Then, using the IPT/EPUSP method, three dosages were performed with different substitutions of natural coarse aggregate (AGN) by AGRCO: 0%, 30% and 100%. Finally, compression tests, traction by diametral compression, traction in flexion and analysis by scanning electron microscopy (SEM) were performed. Thus, it was observed that the mix with 30% of AGRCO presented satisfactory results, remaining in the same strength class as the reference concrete, being viable for use in structural concrete.

Keywords: Concrete; Coarse recycled concrete aggregate; Mechanical properties..

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são provenientes de diversos tipos de obras, formados por diferentes materiais, sendo a separação desses uma maneira eficaz de iniciar o processo de reciclagem, sendo que, para utilização em concretos, é necessário um controle adequado para obter agregados de qualidade (SORMUNEN; KARKI, 2019).

A principal diferença dos agregados reciclados de concreto (ARCO) em relação aos agregados naturais é a presença da argamassa antiga, o que torna sua matriz mais porosa, diminui a densidade e resistência a abrasão (SASANIPOUR; ASLANI, 2020). No entanto, essas propriedades podem ter seus efeitos reduzidos ou evitados se o agregado reciclado for melhor selecionado e beneficiado, pois quanto maior a resistência do concreto de origem menor será a porosidade na zona de transição (ZT) dos novos concretos produzidos (MUDULI; MUKHARJEE, 2020). Atualmente no Brasil, o ARCO pode ser aplicados em concretos com função estrutural, em taxas de substituição limitadas a 20%, normatizados pelas NBR 15113 (ABNT, 2004), NBR 15114 (ABNT, 2004), NBR 15115 (ABNT, 2004) e NBR 15116 (ABNT, 2021).

Portanto, é necessário desenvolver novas técnicas que atendam a segurança de sistemas estruturais construídos com ARCO, permitindo maior aplicabilidade desse. Assim, o trabalho tem objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de concretos produzidos com porcentagens de substituição de agregado graúdo natural (AGN) por agregado graúdo reciclado de concreto (AGRCO) maiores que a especificada por norma e com o controle da resistência característica do material de origem, em conjunto com a análise microestrutural desse compósito. Permitindo a comparação entre esses concretos e a verificação de seus usos com fins estruturais em porcentagens maiores de substituição.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento utilizado foi o CP V ARI RS. A caracterização do agregado miúdo e AGN foi realizada utilizando a NBR 16972 (ABNT, 2021) para massa unitária, composição granulométrica segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica seguindo a NBR 16916 (ABNT, 2021), além da determinação do teor de materiais pulverulentos (ABNT NBR 16973, 2021) e do teor de umidade total (ABNT NBR 9939, 2011) para o AGN. Sendo identificado 0,69% de material pulverulento e um teor de umidade de 0,32%.

O AGRC utilizado tem origem no beneficiamento de corpos de prova cilíndricos (CP's), oriundos do descarte de empresas de controle tecnológico, utilizando somente CP's de concreto com agregado graúdo seixo, tendo resistência de origem à compressão conhecida na faixa de 25 a 35 MPa. O material foi triturado e peneirado, utilizando peneiras com graduações de #25 mm, #19 mm e #4,8 mm, com faixa granulométrica definida entre passantes na #19 mm e retidos na de #4,8 mm. A massa especifica foi calculada com o método proposto por Leite (2001), o teor de material pulverulento encontrado foi de 3,9% e o teor de umidade foi de 5,03%.

Os resultados obtidos com a composição granulométrica e a massa específica dos agregados naturais e reciclados são apresentados na Tabela 1. É possível observar a diferença entre as densidades dos agregados graúdos, com um decréscimo na massa específica do AGRCO em comparação ao AGN. Seguindo a NBR 7211 (ABNT, 2019), o AGN e o AGRCO ficaram na zona granulométrica 9,5/25.

Tabela 1: Ensaios de Caracterização dos Agregados

Material	Massa Específica (g/cm^3)	Massa Unitária (kg/dm^3)	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de Finura
Agregado Miúdo	2,63	1,67	2,4	2,77
Agregado Graúdo Natural	2,66	1,34	19,0	7,79
Agregado Graúdo Reciclado de Concreto	2,62	1,11	19,0	7,66

Fonte: Autores (2023).

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO

Para a dosagem foram utilizadas as curvas de dosagem elaboradas por Santos *et al*. (2015) que aplicou o método de dosagem IPT/EPUSP proposto por Helene e Terzian (1992). Assim, foram realizados três traços

distintos: CCC0, com 100% de AGN; CPC30 com 30% de substituição de AGN por AGRCO; e CPC100 com 100% de AGRCO. Os traços produzidos tiveram o mesmo teor de argamassa, 51%, pretendendo o mesmo Fcj de 30 MPa aos 28 dias, Tabela 2.

Tabela 2: Ensaios de Caracterização dos Agregados

AGRC	Nome	a/c	Consumo de AMN (kg/m³)	Consumo de AGN (kg/m³)	Consumo de AGRC (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)
0%	CCC0	0,59	757,9	1057,2	0,0	342,5
30%	CPC30	0,60	738,6	732,1	310,2	349,9
100%	CPC100	0,66	731,4	0,0	1016,1	338,3

Fonte: Autores (2023).

Para verificar a trabalhabilidade do material, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (ABNT NBR 16889, 2020), sendo observados valores na faixa de 150 ± 20 mm, com pequena redução na trabalhabilidade no concreto CPC100. O concreto foi produzido com todos os materiais estando secos e pesados, utilizando dois tipos de fôrmas, uma cilíndrica de 200 x 100 mm e outra prismática com dimensões de 400 x 100 x 100 mm.

2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

O ensaio de compressão axial foi executado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), após os 28 dias de cura dos CP's, permitindo a aplicação controlada da força sobre o corpo de prova posicionado entre os pratos de compressão com um disco de Neoprene. O ensaio de tração por compressão diametral seguiu a NBR 7222 (ABNT, 2011), em que os CP's foram colocados entre duas chapas metálicas na mesma direção que foram ajustadas a prensa hidráulica de forma a garantir que não houvesse a movimentação desses, para assim ser aplicado o carregamento. Na presente pesquisa, este ensaio foi executado segundo a NBR 12142 (ABNT, 2010), de acordo com o princípio da viga simplesmente apoiada, sendo aplicadas duas forças nos terços dos vãos.

3 RESULTADOS

3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

No que diz respeito a substituição de AGN por AGRCO, é possível analisar uma gradativa diminuição na resistência a compressão e a tração por compressão diametral ao passo em que as taxas de substituição foram aumentando, Tabela 3. De acordo com Figueiredo e Vargas (2016), a diminuição da resistência é consequência direta da maior relação água/cimento, porosidade e microfissuração que ocorre na argamassa aderida ao agregado reciclado no processo de beneficiamento desse. No entanto, quando em pequenas proporções, a resistência à compressão não sofre grandes influências. Com isso, os resultados obtidos neste estudo demonstram esses padrões, tanto na caracterização do AGRCO, como na resistência mecânica do CCC0, CPC30 e CPC100.

Em relação a resistência a tração por flexão, na Tabela 3 é possível analisar resistências semelhantes entre o CCC0 e o CPC100, enquanto no CPC30 houve um aumento de resistência de 14,1%, podendo ser relacionado com os processos de seleção desse resíduo e o efeito de engrenamento de agregados, na qual a substituição de 30% foi muito satisfatória. Resultados de Cardoso (2018), mostram que substituições em poucas quantidades são satisfatórias a depender do bom beneficiamento e seleção do material. Assim, as etapas de controle foram eficientes, havendo uma perda de resistência a compressão e a tração por compressão diametral de apenas 1,93% e 16,84%, respectivamente, e um aumento de 14,10% na tração por flexão, comparando o CPC30 com o CCC0.

Tabela 3: Resultados dos Ensaios Mecânicos

Nome	Resistência Média a Compressão (MPa)	Resistência Média a Tração por Compressão Diametral (MPa)	Resistência Média a Tração por Flexão (MPa)
CCC0	31,1	3,86	6,03
CPC30	30,5	3,21	6,88
CPC100	24,3	2,43	5,86

Fonte: Autores (2023).

3.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL COM MEV

Foi realizado ao longo da superfície das amostras o MEV para melhor compreensão dos efeitos causados pela incorporação do AGRCO. Com isso, Na Figura 1.B, foi possível confirmar no CPC100 uma maior quantidade de poros quando comparado ao CCC0, Figura 1.A, ocorrendo devido a presença da antiga argamassa aderida ao AGRCO, tornando o agregado mais poroso, com maior absorção de água, aumentando a relação a/c.

Figura 1: Análise de Porosidade pelo MEV

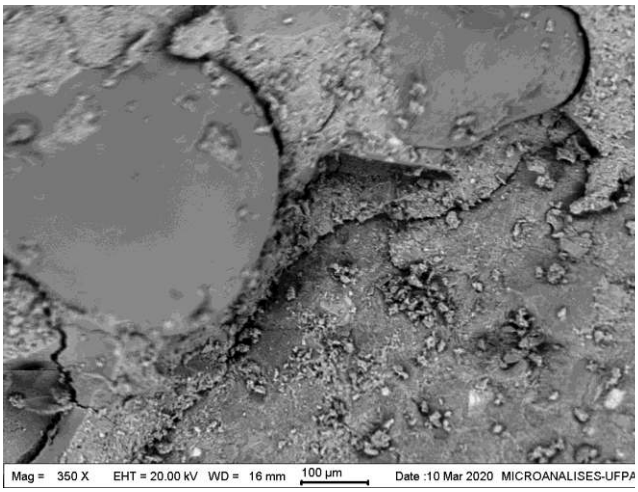


Figura 1a: CCC0

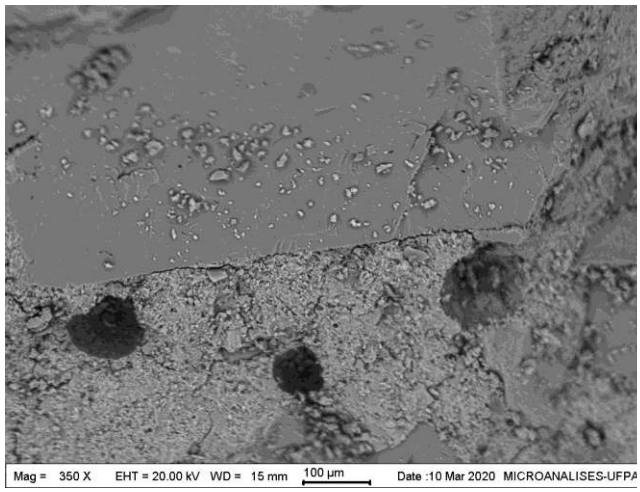


Figura 1b: CPC100

Fonte: Autores (2023).

Utilizando as imagens obtidas através do MEV, em conjunto com os gráficos do Detector de Energia Dispersiva (EDS), foi possível identificar e diferenciar os componentes constituintes das amostras e, a partir disso, analisar a localização das fissuras e sua interferência nas propriedades mecânicas do concreto. A Figura 2.a apresenta o CPC30, onde no ponto 1 foram identificadas grandes quantidades de Si e Ca e em menor quantidade o Al, Figura 2.b, caracterizando um AGRC. Já no ponto 2 detectou-se uma parcela de Ca bem maior em relação ao Si e ao Al, Figura 2.c, designando que esse é um ponto de pasta de cimento. Foi detectado no ponto 3 o elemento Si em maior quantidade que todos os outros, subsequente a esse foi observada uma baixa concentração de Al e Mg, Fe, Ca e K, Figura 2.d, caracterizando o AGN utilizado na amostra. O agregado miúdo natural (AMN) foi identificado no ponto 4, em que o elemento Si representa a maior parcela da areia, Figura 2.e.

Dessa forma, com base no EDS de imagens do MEV para as amostras CCC0, CPC30 e CPC100, foi identificado os materiais e as fissuras de cada uma dessas, como apresentado na Figura 3. No CCC0, figura 3.A, é identificado que as fissuras ocorrem na zona da transição entre o AGN e a pasta de cimento, já nas amostras CPC30 e CPC100, Figuras 3.B e 3.C, as fissuras ocorrem entre o agregado e a antiga ZT.

Figura 2: Análise de Porosidade pelo MEV

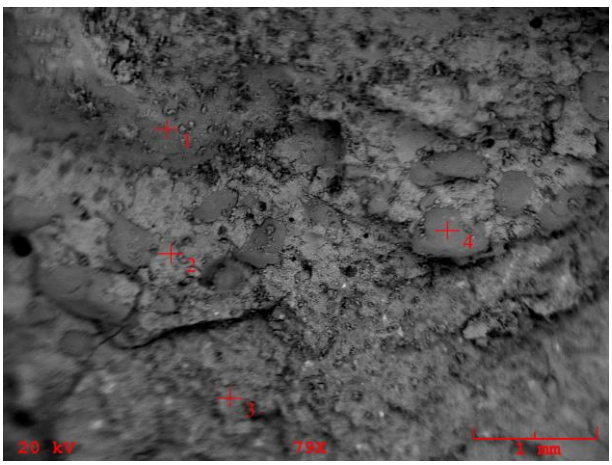


Figura 2a: Ensaio MEV do CPC30

Figura 2: Análise de Porosidade pelo MEV

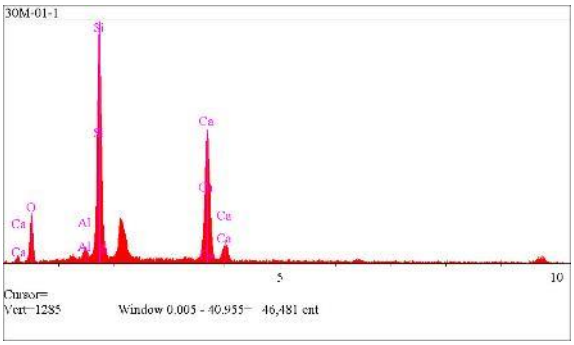


Figura 2b: EDS do ponto 1 (AGRC)

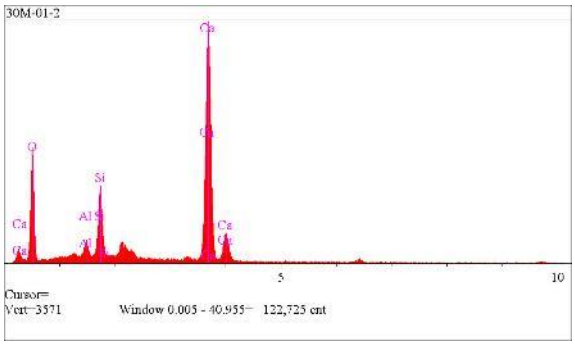


Figura 2c: EDS do ponto 2 (Pasta de cimento)

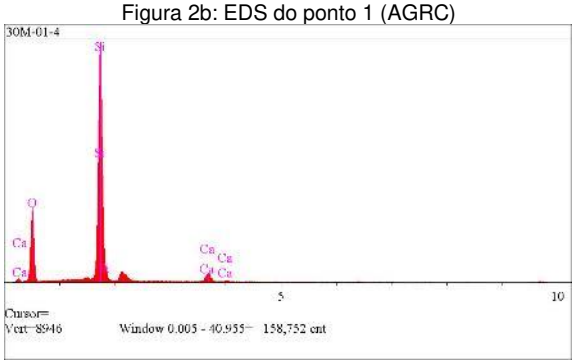


Figura 2d: EDS do ponto 3 (AMN)

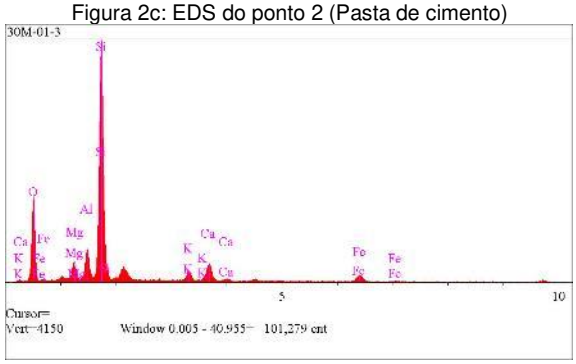


Figura 2e: EDS do ponto 4 (AGN)

Fonte: Autores (2023).

Figura 3: Identificação dos Materiais e Fissuras das Amostras

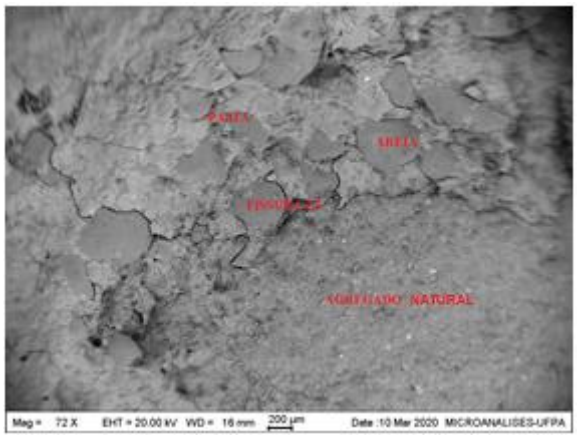


Figura 3a: CCC0

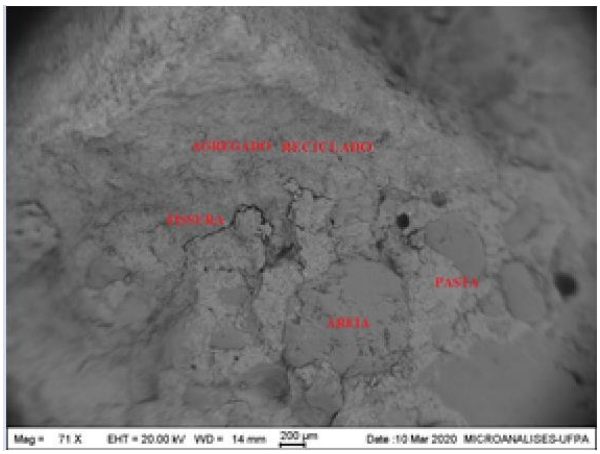


Figura 3b: CPC30

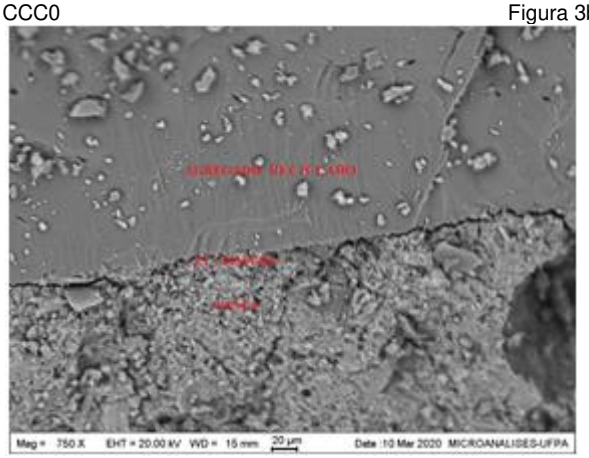


Figura 3c: CPC100

Fonte: Autores (2023).

Com os resultados do MEV, analisados em conjunto com os resultados mecânicos é possível perceber a maior fragilidade do AGRCO em comparação com o AGN, induzindo a falha no AGRCO, devido a microfissuração que ocorre na argamassa antiga aderida ao agregado provocada durante o processo de beneficiamento, levando a reduções na resistência mecânica do concreto.

4 CONCLUSÕES

Foi analisado que, conforme a gradativa incorporação de AGRCO, houve diminuição da resistência a compressão, como possível resultado do aumento da porosidade, decorrente do efeito negativo causado pela presença de argamassa residual do concreto de origem, assim como a maior relação água/cimento e a microfissuração ocorrida nesse agregado, fazendo com que a propagação das fissuras seja entre o agregado e a antiga zona de transição. Da mesma forma, no ensaio de tração por compressão diametral, foi observado perda de resistência, enquanto no ensaio de tração na flexão o concreto CPC30, apresentou resultados melhores que os do traço de referência, devido a uma provável melhora no engrenamento dos agregados. Apesar dessas perdas de resistência, o CPC30 apresentou excelentes resultados, permanecendo na mesma classe de resistência do concreto de origem, diferentemente do CPC100, que mudou para uma classe de resistência inferior. Desse modo, pode-se concluir que os AGRCO, quando separados e controlados, são uma alternativa viável e segura para uso em concretos com fins estruturais, em substituições de até 30%.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**: resíduos sólidos de construção civil e resíduos inertes – aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**: resíduos sólidos de construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implementação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo – determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: agregados – determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: agregados – determinação do material fino que passa pela peneira de 75µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939**: agregado graúdo – determinação do teor de umidade total – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

CARDOSO, A. C. **Efeito da Adição de Agregados Reciclados na Resistência ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado**. Belém, 2018. 103 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

FIGUEIREDO, N.; VARGAS, A. **Análise da influência do uso de agregados reciclados da região de Criciuma/SC nas propriedades mecânicas de concretos estruturais**. Santa Catarina, 2016. 23 f. Tese (Graduação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2016.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle de Concreto. ED. Pini, São Paulo, 1992.

MUDULI, R.; MUKHARJEE, B. B. Performance Assessment of Concrete Incorporating Recycled Coarse Aggregates and Metakaolin: A Systematic Approach. **Construction and Buildings Materials**, v. 233, fev. 2020.

SANTOS, I. L.; NETO, F. S.; MARTINS, L. H. S.; CORDEIRO, L. N. P. Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57, Mato Grosso do Sul, 2015.

SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. Durability Properties Evaluation of Self-Compacting Concrete Prepared with Waste Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates. Construction and Building Materials, v. 236, mar. 2020.

SORMUNEN, P.; KARKI, T. Recycled Construction and Demolition Waste as a Possible Source of Materials for Composite Manufacturing. **Journal of Building Engineering**, v. 24, jul. 2019.