CAPTURA DE CARBONO DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE DIFERENTES TIPOS DE CONCRETO

Carbon capture of recycled coarse aggregates from different types of concrete

Victor Saldanha Cassel
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, RS | victorcassel29@gmail.com

Júlia da Rosa Costa
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, RS | juliadarcosta@hotmail.com

Edna Possan
Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu, PR | epossan@gmail.com

Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, RS | dmolin@ufrgs.br

Resumo

As emissões de CO_2 e a geração de resíduos são uma problemática da construção civil. Com isso, esta pesquisa avalia o potencial de fixação de CO_2 e os efeitos nas propriedades físicas de diferentes tipos agregados graúdos reciclados de concreto submetido ao tratamento com CO_2. Para isso, foram produzidas quatro composições de concreto, variando o tipo de cimento (CP IV-32 e CP V ARI) e a relação água/cimento (0,55 e 0,65) e, após a britagem, as partículas foram colocadas em câmara de carbonatação (UR 65%, CO_2 15%, tempo 24h), para o tratamento com CO_2. Através da análise termogravimétrica (TGA), a captura de CO_2 foi estimada entre 1,84 e 12,81 kgCO_2 por tonelada de agregado. Em relação às propriedades físicas, o concreto que mais capturou CO_2 obteve o maior aumento de massa específica (3,03%) e a maior redução da absorção de água (7,32%) após o tratamento.

Palavras-chave: Captura e uso de carbono; Tratamento com CO_2; Resíduo de construção e demolição; Agregado reciclado de concreto.

ABSTRACT

CO_2 emissions and waste generation represent major challenges in the construction industry. In this context, the present study evaluates the carbon dioxide sequestration potential and the effects on the physical properties of different types of recycled concrete coarse aggregates subjected to CO_2 treatment. Four concrete mixtures were produced, varying the type of cement (CP IV-32 and CP V ARI) and the water-to-cement ratio (0.55 and 0.65). After crushing, the particles were placed in a carbonation chamber (65% RH, 15% CO_2 concentration, for 24 hours) for CO_2 treatment. Through thermogravimetric analysis (TGA), CO_2 uptake was estimated between 1.84 and 12.81 kgCO_2 per ton of aggregate. Regarding physical properties, the concrete that captured the most CO_2 showed the greatest increase in bulk density (3.03%) and the greatest reduction in water absorption (7.32%) after treatment.

Keywords: Carbon capture and utilization; CO_2 treatment; Construction and demolition waste; Recycled concrete aggregate.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil gera altos volumes de resíduos e cerca de 6 bilhões de toneladas de CO_2 anuais (HUANG *et al.,* 2018). A tecnologia CCUS ("Carbon Capture, Utilization and Storage") aplicada ao tratamento de agregados reciclados surge como uma alternativa viável para aumentar a reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e contribuir com a descarbonização do setor (TIEFENTHALER *et al.*, 2021).

Resíduos de concreto, devido à sua reserva alcalina, podem capturar CO_2 rapidamente em ambientes de carbonatação acelerada (SERENG *et al.,* 2021). O carbonato de cálcio ($CaCO_3$) resultante preenche poros

e microfissuras, melhorando as propriedades físicas e microestruturais dos agregados reciclados de concreto carbonatados (ARC) (SHI *et al.,* 2016; LI *et al.*, 2022).

Neste processo tem-se dois objetivos centrais, que visam melhorar as propriedades do material ou maximizar a quantidade de captura de CO_2. Estes objetivos dependem das condições de contorno do tratamento com CO_2 (teor, umidade, tempo de exposição, temperatura e pressão), assim como das características físico-químicas dos agregados que serão tratados (VILLAGRAN-ZACCARDI *et al.,* 2025). O presente estudo avalia o potencial de captura de carbono e as propriedades de agregados de concreto com diferentes composições, expostos ao CO_2 de forma acelerada por 24h.

2. METODOLOGIA

2.1 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Os agregados utilizados na pesquisa foram obtidos de concretos produzidos em laboratório. Quatro composições diferentes foram definidas, pelo método do IPT/EPUSP (HELENE; TERIZAN, 1992), variando o tipo de cimento (CP IV-32 e CP V ARI) e a relação água/cimento (0,55 e 0,65) (Tabela 1).

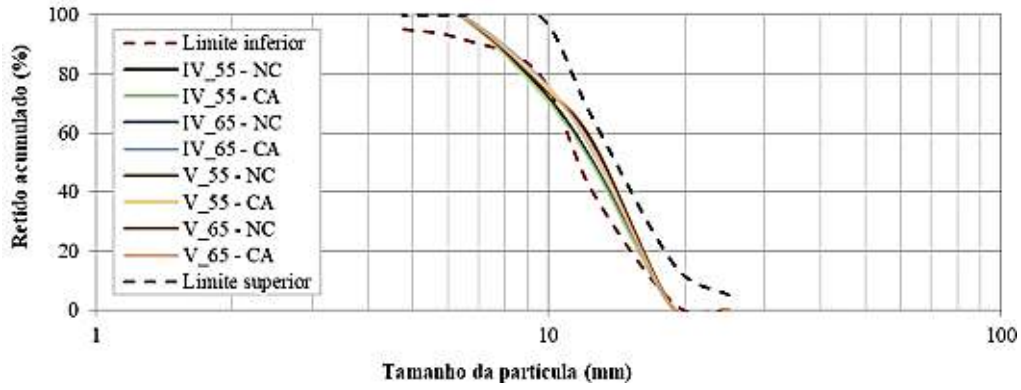
Tabela 1: Composição dos concretos

Identificação	Cimento	Traço				
		m	Cimento	Areia	Brita	a/c
IV_55	CP IV-32	5,43	1	2,34	3,08	0,55
IV_65		6,73	1	3,02	3,71	0,65
V_55	CP V ARI	5,63	1	2,45	3,18	0,55
V_65		7,02	1	3,17	3,85	0,65

Fonte: (CASSEL, 2024)

A obtenção dos agregados reciclados envolveu a cominuição dos materiais, realizada em um britador de mandíbulas (CASSEL, 2024). Após, o material foi processado em um peneirador mecânico, que separou os agregados graúdos dos miúdos, sendo selecionadas as partículas passantes na peneira #19mm e retidas na peneira #4,75mm. Na Figura 1 consta a distribuição granulométrica dos agregados não carbonatados (NC) e carbonatados (CA).

Figura 1: granulometria dos agregados



Fonte: (CASSEL, 2024)

2.2 TRATAMENTO COM CO_2

Antes do tratamento com CO_2, os agregados reciclados passaram por sazonamento para equilibrar a umidade com o ambiente climatizado (23±2ºC, UR 50±5%). O tratamento seguiu um protocolo baseado em estudos para simular um processo industrial (SERENG *et al.,* 2021). Os agregados, dispostos em camadas de 5 cm em bandejas plásticas, foram expostos ao CO_2 por 24h em câmara de carbonatação (23±2ºC, UR 60±10%, CO_2 15%).

2.3 AVALIAÇÃO DA CAPTURA DE CO_2

O potencial de captura de CO_2 dos ARC foi determinado por análise termogravimétrica (TGA), quantificando a perda de massa com o aumento da temperatura. Para isso, 50g de agregados carbonatados (CA) e não carbonatados (NC) foram selecionados, com três amostras representativas por grupo. Frações de argamassa aderida foram extraídas, moídas, peneiradas (>0,15mm) e armazenadas em tubos vedados para evitar contato com umidade e CO_2.

A análise foi realizada no PerkinElmer STA 8000, com atmosfera de nitrogênio (30ml/min) e cadinho de alumina, utilizando 50mg por amostra. Após uma isoterma a 35 ºC por 1 hora para remoção da água livre, o aquecimento ocorreu de 35ºC a 900ºC a 10ºC/min, conforme Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016). Os dados foram processados no OriginPro 8.5 para gerar gráficos TG e DTG, identificando perdas de massa e decomposição de compostos como C-S-H, etringita, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio. O carbono fixado foi determinado a partir da perda de massa no último pico da DTG (500-750ºC), subtraindo-se os valores da amostra não carbonatada (NC) (MAZURANA *et al.*, 2021).

2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Para o ensaio de teor de argamassa aderida, seguiu-se a metodologia de Abbas *et al.* (2009). Foram selecionados 3kg de agregados reciclados de concreto: 2kg (19-9,5mm) e 1 kg (9,5-4,75mm). As amostras foram secas a 105ºC por 24h e, depois, imersas por 24 horas em solução de sulfato de sódio a 26% em peso. Em seguida, passaram por cinco ciclos de congelamento (-17ºC por 16h) e descongelamento (80ºC por 8h).

Finalizado o último ciclo, os agregados foram removidos da solução de sulfato de sódio e lavados em peneira com abertura de 4,75mm, para remover completamente a argamassa aderida. Por fim, os materiais foram novamente secos em estufa por 24h, possibilitando a determinação da massa seca do agregado natural. O teor de argamassa aderida foi calculado utilizando a **Equação 1**.

$$RMC = \left[\frac{W_{ARC} - W_{OVA}}{W_{ARC}}\right] * 100 \quad (1)$$

Onde: RMC = teor de argamassa aderida (%); W_{ARC} = massa inicial seca do agregado graúdo reciclado (kg); W_{OVA} = massa final seca do agregado graúdo natural (kg).

Os demais ensaios realizados para a caracterização física dos agregados reciclados de concreto foram: índice de forma – NBR 7809 (ABNT, 2019); massa unitária – NBR 16972 (ABNT, 2021); massa específica e absorção de água – NBR 16917 (ABNT, 2021). Para fins de comparação com as amostras sem tratamento, os ensaios de massa específica e absorção de água foram realizados para as amostras tratados com CO_2.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

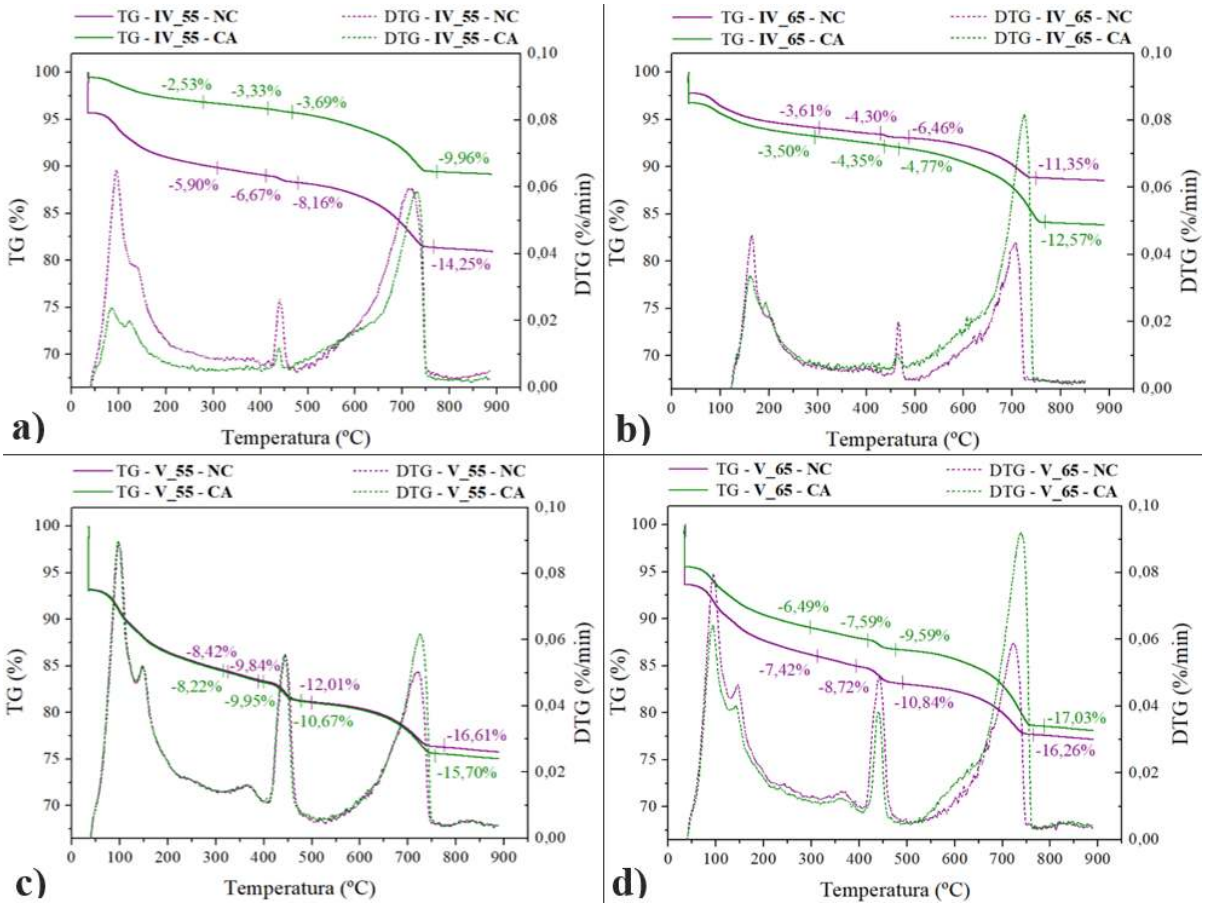
3.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

Os resultados das análises termogravimétrica (TGA) e suas derivadas (DTG) são apresentados na Figura 2, permitindo a comparação dos picos de decomposição do C-S-H, etringita, hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Os gráficos foram organizados separadamente para as amostras de agregado reciclado não carbonatado (NC) e carbonatado (CA).

O aumento expressivo do pico de $CaCO_3$ (500-750ºC) nas amostras IV_65 e V_65 indica que a relação água/cimento influenciou mais a captura de CO_2 do que o tipo de cimento. Esse efeito está relacionado à porosidade do material e à maior disponibilidade de água livre nos poros, facilitando a reação dos produtos hidratados com o CO_2 e formando $CaCO_3$ (NEVES JÚNIOR *et al.,* 2012).

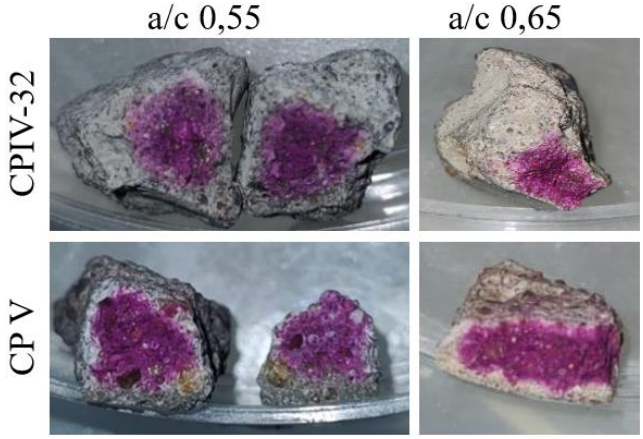
O pico de $Ca(OH)_2$ (400-500ºC) foi maior nos traços com CP V, devido à maior concentração de CaO em sua composição. Nas amostras carbonatadas, houve redução desse pico, indicando consumo parcial do $Ca(OH)_2$, ou seja, a carbonatação foi parcial, como ilustrado na Figura 3, com difusão de CO_2 por fenolftaleína.

Figura 2: TGs e DTGs dos ARC NC e CA, onde (a) IV_55, (b) IV_65, (c) V_55, (d) V_65



Fonte: (CASSEL, 2024)

Figura 3: Carbonatação pela difusão de CO_2 nos agregados reciclados a partir da aspersão fenolftaleína



Fonte: Autor, 2025

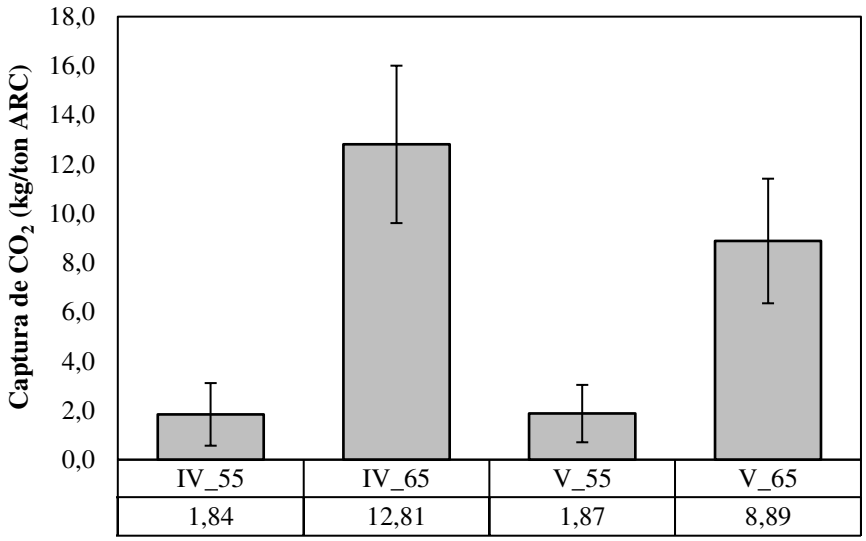
A análise das imagens confirma que o tratamento não resultou em carbonatação completa, em concordância com os dados de TGA e DTG. A carbonatação parcial dos agregados reciclados foi observada em estudos anteriores com protocolos de curta duração para avaliar a profundidade da reação (GHOLIZADEH-VAYGHAN *et al.*, 2020; SERENG *et al.*, 2021). Com base nesses resultados, melhorias no protocolo de sazonamento e nos parâmetros operacionais, como temperatura, concentração e fluxo de CO_2, podem otimizar o processo para alcançar carbonatação completa em menor tempo.

3.2 CAPTURA DE CO_2

A análise termogravimétrica (TGA) mostrou diminuição nos teores de C-S-H e $Ca(OH)_2$ nas amostras carbonatadas, indicando o consumo dos produtos de hidratação pela reação de carbonatação e o aumento de $CaCO_3$. As amostras com maior relação água/cimento apresentaram maior capacidade de captura de CO_2, como mostrado na Figura 4. A maior porosidade das matrizes com relação água/cimento de 0,65

favoreceu a difusão mais rápida do CO_2 durante as 24 horas de tratamento, resultando em um aumento mais significativo do teor de $CaCO_3$.

Figura 4: Captura de CO_2 dos agregados reciclados



Fonte: Autor, 2025

Em estudos anteriores de aplicação industrial (TIEFENTHALER *et al.*, 2021) e em laboratório (XUAN; ZHAN; POON, 2016; FANG; XUAN; POON, 2017; SERENG *et al.*, 2021) do tratamento de agregados reciclados com CO_2, a captura de CO_2 foi entre 7,90 e 12,10kgCO_2/t. As diferenças no protocolo de tratamento e nas características do concreto que originaram os agregados reciclados, como tipo de cimento, resistência mecânica e porosidade, explicam a variação do potencial de captura de CO_2.

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

Apesar das diferentes composições do concreto de origem, os quatro tipos de agregados reciclados apresentaram valores próximos no teor de argamassa aderida, índice de forma e massa unitária, conforme os resultados do Tabela 2. A utilização do mesmo processo e equipamento de britagem pode ter influenciado na obtenção de resultados próximos, resultando em agregados com formato alongado e lamelar (SAMPAIO *et al.*, 2021).

Tabela 2: Caracterização dos agregados reciclados

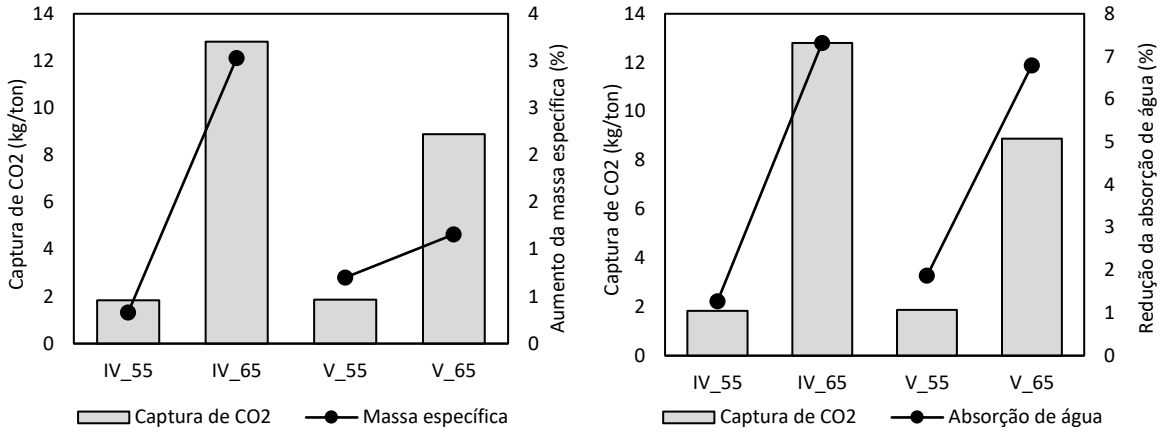
Agregados reciclados	Argamassa aderida (%)	Índice de forma	Massa unitária (g/cm³)	Massa específica (g/cm³)		Variação (%)	Absorção de água (%)		Variação (%)
				NC	CA		NC	CA	
IV_55	43,17	1,97	1,31	2,52	2,53	↑0,33	6,32	6,24	↓1,27
IV_65	41,69	2,15	1,35	2,47	2,54	↑3,03	6,42	5,95	↓7,32
V_55	46,77	2,08	1,29	2,50	2,52	↑0,70	5,89	5,78	↓1,87
V_65	47,23	2,06	1,39	2,50	2,53	↑1,16	6,19	5,77	↓6,79

Fonte: Autor, 2025

Os ensaios de massa específica e absorção de água mostraram que a carbonatação parcial aumentou a densidade da matriz cimentícia e reduziu a porosidade nos quatro tipos de agregados reciclados, constatando a eficácia do tratamento com CO_2 na melhoria das propriedades físicas. Além disso, os agregados carbonatados (CA) de concretos com maior relação água/cimento apresentaram maior variação em comparação aos não carbonatados (NC), indicando correlação direta com a quantidade de CO_2 capturado, como ilustrado na Figura 5.

A análise dos valores de massa específica e sua variação entre os agregados carbonatados e não carbonatados está de acordo com a literatura, apresentando variação entre 0,6% e 5,6%, independentemente do protocolo de tratamento (PU *et al.*, 2021). Em relação à absorção de água, a melhoria dessa propriedade depende do protocolo, já que maior difusão de CO_2 resulta em maior redução da porosidade. Estudos com tratamentos de longa duração para carbonatação completa mostraram reduções na absorção de água entre 15% e 30% (LUO *et al.*, 2018; LU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020). No estudo de Sereng *et al.* (2021), a relação água/cimento do concreto influenciou a eficiência do tratamento na redução da absorção de água.

Figura 5: Correlação da captura de CO_2 com (a) aumento da massa específica, (b) redução da absorção de água



a) b)

Fonte: Autor, 2025

4. CONCLUSÕES

A análise termogravimétrica (TGA) revelou que a captura de CO_2 pelos agregados variou de 1,84 a 12,81kgCO_2 por tonelada, com maior influência da relação água/cimento em comparação ao tipo de cimento. Agregados com maior relação água/cimento apresentaram maior potencial de captura, apesar da carbonatação ser parcial em todos os casos. O tratamento com CO_2 melhorou as propriedades físicas dos agregados, como massa específica e absorção de água, com destaque para o IV_65, que teve a maior captura de CO_2. Esses resultados indicam que o tratamento com CO_2 de agregados reciclados é promissor, ajudando a reduzir o impacto ambiental e aumentar o reaproveitamento de resíduos de construção, com potencial para ser aprimorado, elevando a quantidade de carbono fixado em menor tempo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pelo apoio ao desenvolvimento do projeto experimental. O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de pesquisa. A professora Edna Possan agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de pesquisa (407060/2021-9).

REFERÊNCIAS

ABBAS, A. et al. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 716-728, jul. 2009. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.01.010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917: Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972: Agregado Graúdo – Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2019.

CASSEL, V. S. **Tratamento com uso de CO_2 de agregados graúdos reciclados de concretos controlados: propriedades microestruturais e captura de CO_2**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

FANG, X.; XUAN, D.; POON, C. S. Empirical modelling of CO_2 uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 4, 1 ago. 2017. https://doi.org/10.1617/s11527-017-1066-y

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A. et al. The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119486, out. 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119486

HELENE, Paulo RL; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto,** Ed. PINI, S. Paulo, SP, 1992.

HUANG, L. et al. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 2, p. 1906-1916, jan. 2018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001

LI, L. et al. Mineralization and utilization of CO_2 in construction and demolition wastes recycling for buildings materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder. **Separation and Purification Technology**, v. 298, p. 121512, out. 2022. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121512

LU, B. et al. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 421–428, 1 out. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.350

LUO, S. et al. Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 956–965, 10 nov. 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.159

MAZURANA, L. **Captura de CO_2 em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, UTFPR, Medianeira.

NEVES JUNIOR, A. et al. Early stages hydration of high initial strength Portland cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 108, n. 2, p. 725-731, 7 mar. 2012. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2256-z

PU, Y. et al. Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 282, 3 mai. 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122671

SAMPAIO, C. et al. Characterization of demolished concretes with three different strengths for recycling as coarse aggregate. **Minerals**, v. 11, n. 8, 1 ago. 2021. https://doi.org/10.3390/min11080803

SCRIVENER, K; SNELLINGS, R; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.** London: CRC Press - Taylor e Francis Group, 2016.

SERENG, M. et al. Improvement of recycled aggregates properties by means of CO_2 uptake. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6571, 16 jul. 2021. https://doi.org/10.3390/app11146571

SHI, C. et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466-472, jan. 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057

TIEFENTHALER, J. et al. Technological demonstration and Life Cycle Assessment of a negative emission value chain in the Swiss concrete sector. **Frontiers in Climate**, v. 3, 13 out. 2021. https://doi.org/10.3389/fclim.2021.729259

VILLAGRAN-ZACCARDI, Y. et al. Carbonated recycled concrete aggregates in construction: potential and bottlenecks identified by RILEM TC 309-MCP. **Materials and Structures**, v. 58, n. 1, 2025. https://doi.org/10.1617/s11527-024-02489-6

WANG, J. et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 234, 20 fev. 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117366

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 67-74, 1 jan. 2016. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018