



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 CO₂ e a geração de resíduos são uma problemática da construção civil. Com isso, esta pesquisa avalia o potencial de fixação de CO₂ e os efeitos nas propriedades físicas de diferentes tipos agregados graúdos reciclados de concreto submetido ao tratamento com CO₂. 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%, CO₂ 15%, tempo 24h), para o tratamento com CO₂. Através da análise termogravimétrica (TGA), a captura de CO₂ foi estimada entre 1,84 e 12,81 kgCO₂ por tonelada de agregado. Em relação às propriedades físicas, o concreto que mais capturou CO₂ 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 CO₂; Resíduo de construção e demolição; Agregado reciclado de concreto.

ABSTRACT

CO₂ 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 CO₂ 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% CO₂ concentration, for 24 hours) for CO₂ treatment. Through thermogravimetric analysis (TGA), CO₂ uptake was estimated between 1.84 and 12.81 kgCO₂ per ton of aggregate. Regarding physical properties, the concrete that captured the most CO₂ 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; CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ rapidamente em ambientes de carbonatação acelerada (SERENG *et al.*, 2021). O carbonato de cálcio (CaCO₃) 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 CO₂. Estes objetivos dependem das condições de contorno do tratamento com CO₂ (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 CO₂ 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).

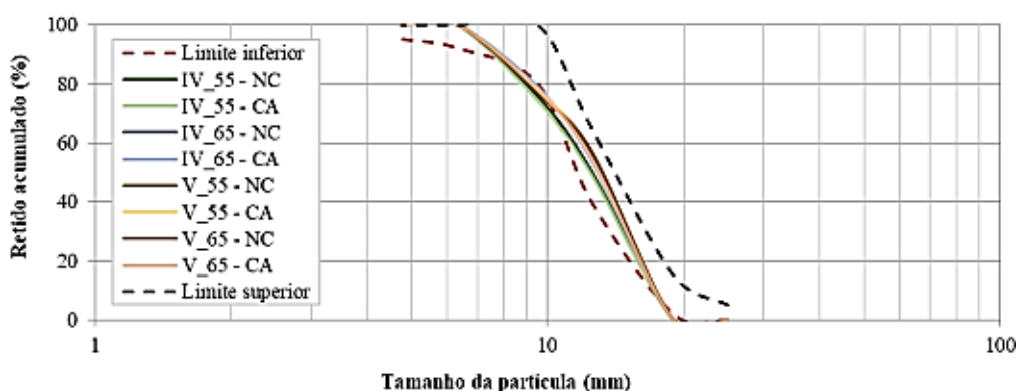
Tabela 1: Composição dos concretos

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



2.2 TRATAMENTO COM CO₂

Antes do tratamento com CO₂, os agregados reciclados passaram por sazonalização para equilibrar a umidade com o ambiente climatizado (23±2°C, 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 CO₂ por 24h em câmara de carbonatação (23±2°C, UR 60±10%, CO₂ 15%).

2.3 AVALIAÇÃO DA CAPTURA DE CO₂

O potencial de captura de CO₂ 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 CO₂.

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 °C por 1 hora para remoção da água livre, o aquecimento ocorreu de 35°C a 900°C a 10°C/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 (500-750°C), 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 105°C 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 (-17°C por 16h) e descongelamento (80°C 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 gráudo reciclado (kg); W_{OVA} = massa final seca do agregado gráudo 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 CO₂.

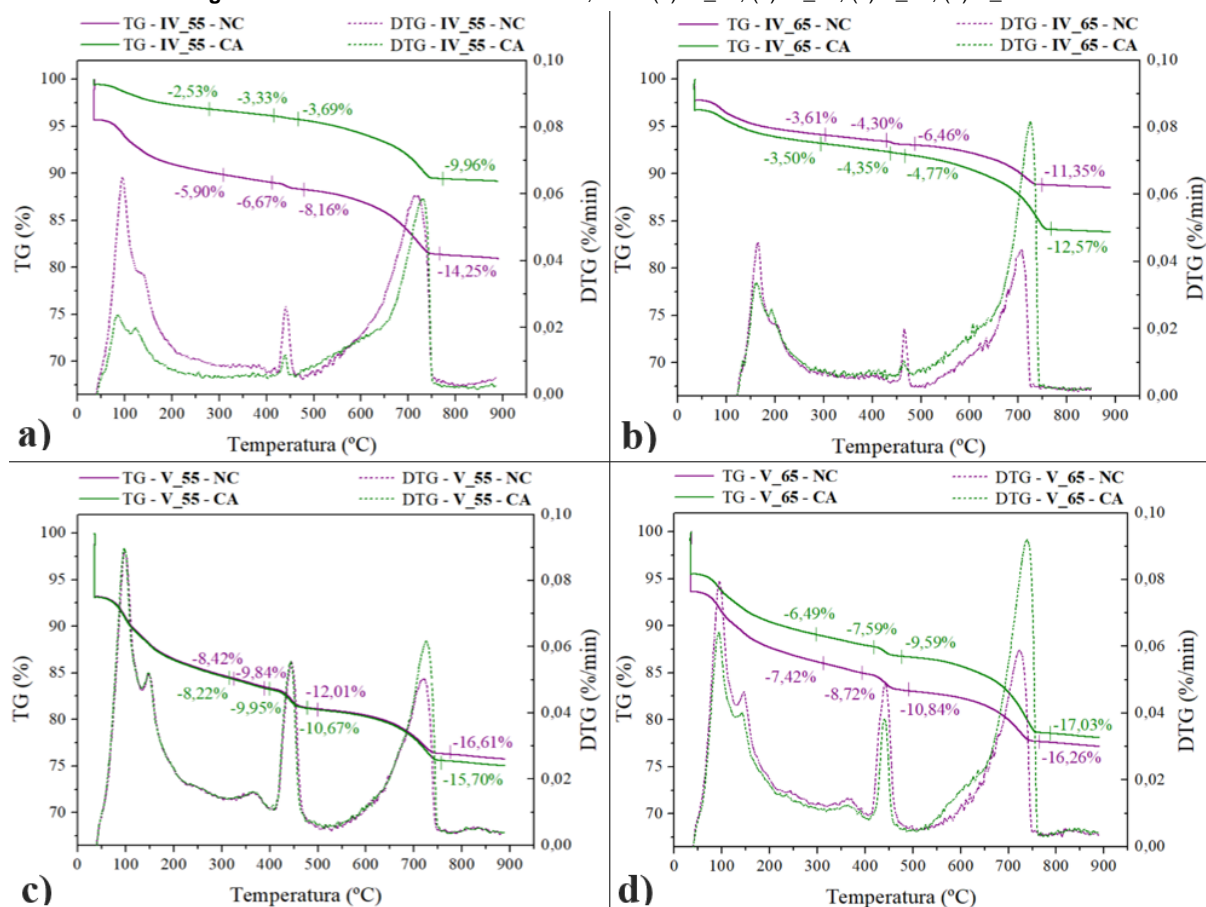
3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

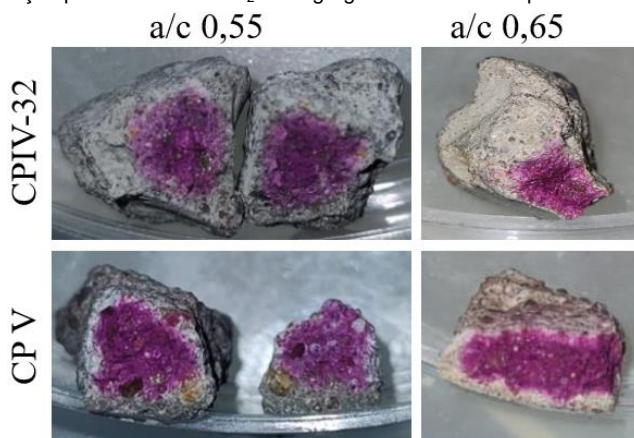
Os resultados das análises termogravimétrica (TGA) e suas derivadas (DTG) são apresentados na Figura 2, permitindo a comparação dos picos de decomposição do C-S-H, etringita, hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e carbonato de cálcio (CaCO₃). Os gráficos foram organizados separadamente para as amostras de agregado reciclado não carbonatado (NC) e carbonatado (CA).

O aumento expressivo do pico de CaCO₃ (500-750°C) nas amostras IV_65 e V_65 indica que a relação água/cimento influenciou mais a captura de CO₂ 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 CO₂ e formando CaCO₃ (NEVES JÚNIOR *et al.*, 2012).

O pico de Ca(OH)₂ (400-500°C) 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 CO₂ por fenoltaleína.

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 CO₂ nos agregados reciclados a partir da aspersão fenolftaleína

Fonte: Autor, 2025

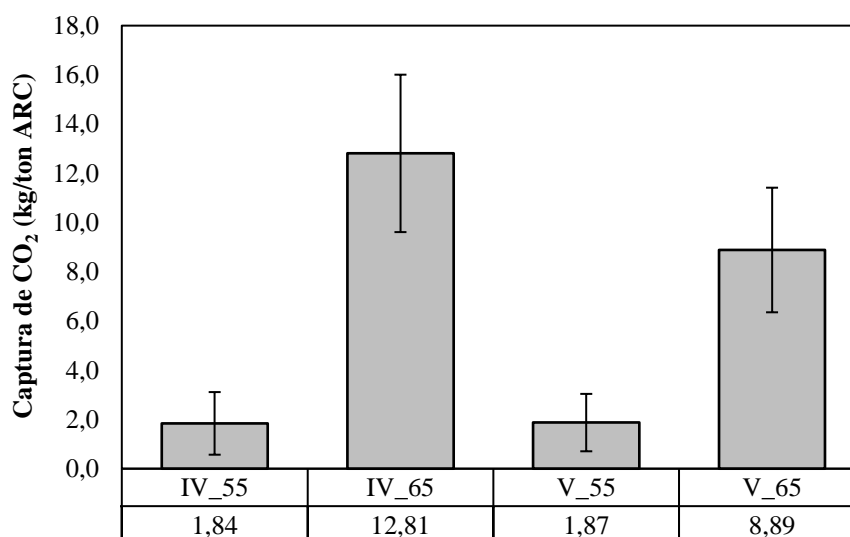
A análise das imagens confirma que o tratamento não resultou em carbonatação completa, em concordância com os dados de TGA e DTG. A carbonatação parcial dos agregados reciclados foi observada em estudos anteriores com protocolos de curta duração para avaliar a profundidade da reação (GHOLIZADEH-VAYGHAN *et al.*, 2020; SERENG *et al.*, 2021). Com base nesses resultados, melhorias no protocolo de sazonalização e nos parâmetros operacionais, como temperatura, concentração e fluxo de CO₂, podem otimizar o processo para alcançar carbonatação completa em menor tempo.

3.2 CAPTURA DE CO₂

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 CaCO₃. As amostras com maior relação água/cimento apresentaram maior capacidade de captura de CO₂, como mostrado na Figura 4. A maior porosidade das matrizes com relação água/cimento de 0,65

favoreceu a difusão mais rápida do CO₂ durante as 24 horas de tratamento, resultando em um aumento mais significativo do teor de CaCO₃.

Figura 4: Captura de CO₂ 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 CO₂, a captura de CO₂ foi entre 7,90 e 12,10kgCO₂/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 CO₂.

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).

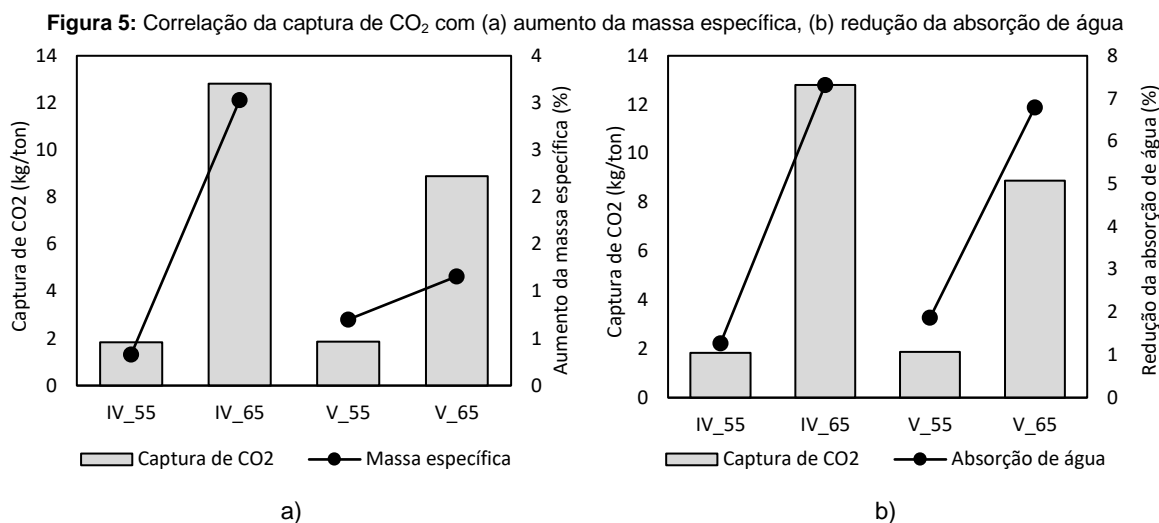
Tabela 2: Caracterização dos agregados reciclados

Agregados reciclados	Argamassa aderida (%)	Índice de forma	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)		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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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.



Fonte: Autor, 2025

4. CONCLUSÕES

A análise termogravimétrica (TGA) revelou que a captura de CO₂ pelos agregados variou de 1,84 a 12,81kgCO₂ 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 CO₂ 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 CO₂. Esses resultados indicam que o tratamento com CO₂ 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 CO₂ de agregados graúdos reciclados de concretos controlados: propriedades microestruturais e captura de CO₂**. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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>