XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9024

Fixação de CO_2 em areia reciclada de concreto sob diferentes condições de umidade

CO_2 uptake by recycled concrete fine aggregate under different moisture conditions

Pamela Leticia dos Santos Bez Fontana
UNILA | Foz do Iguaçu | Brasil | pamelaleticia2002@gmail.com
Gabriel Petermann Stoeckl
IFPR | Foz do Iguaçu | Brasil | gabrielp.ifpr2024@gmail.com
Dayana Ruth Oliveira Pruner
UFPR | Curitiba | Brasil | dayruth@gmail.com
Edna Possan
UNILA | Foz do Iguaçu |edna.possan@unila.edu.br
Kathleen Dall Bello de Souza Risson
IFPR | Foz do Iguaçu | Brasil | kathleen.souza@ifpr.edu.br

Resumo

A mineralização de dióxido de carbono (CO_2) por carbonatação acelerada é uma estratégia promissora para a fixação de CO_2 em resíduos da construção. Este estudo avaliou a influência do teor de umidade (6%, 12% e 18%) da areia reciclada de concreto na fixação de CO_2 após 0,5 h, 2 h e 24 h de exposição em câmara de carbonatação (60 ± 2°C, 15% de CO_2 e umidade relativa de 60 ± 10%). A quantidade de CO_2 fixado foi quantificada por análise termogravimétrica (TGA), enquanto a massa específica, o pH e a morfologia foram avaliados por ensaios físico-químicos e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A fixação variou de 3,47 a 45,58 kg CO_2/t de areia reciclada, conferindo aumento da massa específica e redução do pH. O teor de umidade de 18% apresentou os maiores valores de fixação de CO_2, sendo 24 h a condição mais eficiente para o processo.

Palavras-chave: Uso de carbono. Economia circular. Resíduos de construção e demolição.

Abstract

Carbon dioxide (CO_2) mineralization through accelerated carbonation is a promising strategy for permanent CO_2 sequestration in construction waste. This study evaluated the influence of the moisture content (6%, 12%, and 18%) of recycled concrete fines on CO_2 uptake after 0.5 h, 2 h, and 24 h of exposure in a carbonation chamber (60 ± 2 °C, 15% CO_2, and 60 ± 10% relative humidity). The amount of CO_2 sequestered was quantified by thermogravimetric analysis (TGA), while particle density, pH, and morphology were evaluated through physicochemical tests and scanning electron microscopy (SEM). CO_2 uptake ranged from 3.47 to 45.58 kg CO_2/t of recycled concrete fines, resulting in increased particle density and reduced pH. A moisture content of 18% achieved the highest CO_2 uptake, with 24 h being the most effective carbonation condition.

Keywords: Carbon utilization. Circular economy. Construction and demolition waste.

INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO_2) destaca-se como um dos principais gases de efeito estufa [1], e o aumento da sua concentração na atmosfera contribui para as mudanças

climáticas, resultando em impactos ambientais adversos para os ecossistemas e a qualidade de vida da população [2]. Em termos globais, 37% de todas as emissões de CO_2 são provenientes do setor da construção civil [3], sendo a indústria cimenteira responsável por até 9% [4,5].

Diante desse problema, os roteiros de descarbonização (roadmaps), indicam diferentes estratégias para a mitigação das emissões de CO_2, sendo as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) as com maior potencial de contribuição [6]. No contexto de uso de CO_2, destacam-se aplicações na indústria de alimentos e bebidas, na conversão em combustíveis, na produção de produtos químicos e na mineralização de CO_2 por carbonatação mineral, entre outras [7,8].

A mineralização é um processo baseado na conversão do dióxido de carbono em minerais estáveis a base de carbonato [9], promovendo o uso e a captura permanente do CO_2 a depender da aplicação. Estudos têm demonstrado que a mineralização de CO_2 por carbonatação acelerada de agregados reciclados promove a fixação de CO_2, com valores da ordem de 20 kg CO_2/t [10] a 47 kg CO_2/t [11], dependendo da composição do material, da granulometria e das condições de carbonatação [12,13]. Além da fixação de CO_2, a carbonatação mineral pode promover melhorias nas propriedades das partículas [14].

Embora a carbonatação acelerada tenha sido amplamente investigada em areias recicladas de concreto e em outros resíduos cimentícios [15–17], ainda são escassos os estudos que avaliam a influência do teor de umidade inicial da amostra sobre a eficiência da mineralização de CO_2 e as propriedades físico-químicas do material. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do teor de umidade inicial da areia reciclada de concreto na fixação de CO_2 e nas propriedades físico-químicas do material.

MATERIAIS E MÉTODO

A areia reciclada de concreto (ARC) foi obtida a partir de corpos de prova empregados para o controle tecnológico em central dosadora de concreto. O processo de cominuição foi realizado na máquina Abrasão Los Angeles por 0,5 h, carregada com 30 kg de material e 24 esferas de aço inoxidável (48 mm de diâmetro), com massas individuais variando de 390 a 445 g. A velocidade de rotação foi fixada em 30 rpm.

Os concretos cominuídos foram peneirados, a fração passante na peneira de 0,15 mm foi descartada, e o material restante foi dividido em quatro frações granulométricas (2,4- 1,2 mm; 1,2–0,6 mm; 0,6–0,3 mm; e 0,3–0,15 mm). As frações foram então recompostas em proporções equivalentes às especificadas para a areia normal pela NBR 7215 [18], gerando a ARC, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Processo de obtenção da areia reciclada de concreto (ARC)



Fonte: os autores

A composição de óxidos da ARC, determinada por fluorescência de raios X (FRX) usando um espectrômetro Bruker S8 Tiger (WDS), equipado com tubo de ródio (Rh), conforme Tabela 1. Para os elementos de maior concentração nas amostras, a calibração foi realizada utilizando o pacote GeoQuant T® da Bruker, composto por padrões de rochas e minerais naturais.

Tabela 1: Composição química da areia reciclada de concreto (ARC) por FRX

Materials	Composição química (%)										
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	SO_3	Na_2O	MnO	P_2O_5	PF
ARC	61,63	12,66	6,29	7,56	3,41	0,74	0,49	1,07	0,11	0,15	5,11

PF: Perda ao fogo

A sílica (SiO_2) é o principal óxido da ARC (Tabela 1), com um teor de 61,63% e sua origem está associada, principalmente, aos agregados naturais presente no concreto. A alumina (Al_2O_3) está relacionada, principalmente, aos feldspatos presente na areia de britagem de rocha basáltica comumente usada na região, e do cimento. O óxido de cálcio (CaO) está associado ao aglomerante usado no concreto de origem [19].

MINERALIZAÇÃO DE CO_2 POR CARBONATAÇÃO ACELERADA

A mineralização de CO_2 por carbonatação acelerada na ARC foi realizada em câmara de carbonatação (BASS, modelo UUC-RH-STD-CO_2-1000/2016) em processo gás-sólido. Cerca de 150 g de amostra de pó foram colocados em um recipiente, com pulverização de água nos teores de 6%, 12% e 18%. Após a aplicação da água, as amostras de ARC foram movimentados para uniformização da umidade e na sequência foram colocados na câmara de carbonatação (Figura 2) a 60 ± 2 °C, com umidade relativa de 60 ± 10%, fluxo de CO_2 de 5 L/min e concentração de CO_2 de 15% (150.000 ppm), por períodos de 0,5 h, 2 h e 24 h.

Para cada período de interesse, após a retirada da câmara de CO_2, os pós foram secos em estufa laboratorial a 40 ± 5 °C por 48 h. Essa temperatura foi selecionada intencionalmente para remover água livre, sem induzir a desidratação da etringita ou de outras fases hidratadas [20]. Por fim, as amostras foram mantidas em recipientes herméticos para os ensaios de caracterização.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.9024

Figura 2: Mineralização de CO_2 em areias recicladas de concreto na câmara de carbonatação



Fonte: os autores

As amostras foram identificadas por uma nomenclatura composta, na qual ARC corresponde à areia reciclada de concreto e NC indica a amostra não carbonatada, utilizada como referência. Para as amostras submetidas à mineralização, a identificação contempla o teor de umidade e o tempo de exposição ao CO_2. Assim, ARC-6%-0,5h corresponde à areia reciclada de concreto submetida à carbonatação, com teor de umidade de 6% e tempo de exposição de 0,5 h. As demais amostras seguem a mesma lógica de identificação, variando o teor de umidade e/ou o tempo de exposição ao CO_2.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A estimativa da fixação de CO_2 pelas areias recicladas de concreto (ARC) foi realizada por meio da análise termogravimétrica (TGA), com base na perda de massa associada à decomposição térmica do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), na forma de calcita, na faixa de temperatura entre 550 e 800 °C. Os teores de CO_2 foram normalizados pela massa residual das amostras a aproximadamente 1000 °C, e a quantidade de CO_2 fixada foi obtida pela diferença entre os valores normalizados das amostras carbonatadas e não carbonatadas [21].

Para a análise, aplicou-se o protocolo de parada da hidratação [22]. Em seguida, as amostras com aproximadamente 20 mg, foram submetidas à análise termogravimétrica, sob fluxo de nitrogênio de 30 $mL \cdot min^{-1}$, com faixa de aquecimento de 30 a 1000 °C e taxa de aquecimento de 10 $°C \cdot min^{-1}$ [20].

A caracterização microestrutural foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em equipamento Zeiss EVO MA10. As areias foram depositadas sobre fita de carbono e metalizados com ouro em um equipamento Sputter Coater Quorum SC7620 (15 mA por 90 s). As imagens foram obtidas utilizando filamento de tungstênio, com tensão de aceleração de 10 kV, conforme [23].

A densidade (ρ) das areias foi determinada por picnometria a gás, utilizando um picnômetro Anton Paar, modelo Ultrapyc 5000, com nitrogênio ultrapuro (N_2) como

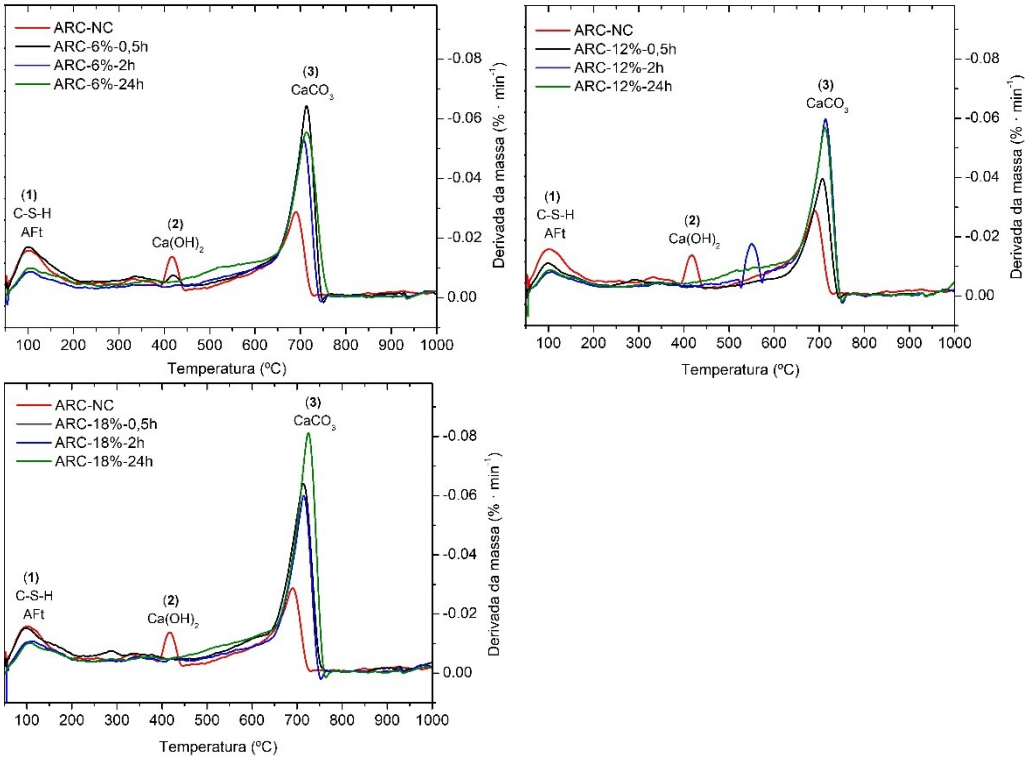
gás de análise, operando à pressão de 10 psi. O ensaio foi realizado a 20 °C, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR ISO 12154 [24].

O potencial hidrogeniônico (pH) das amostras foi determinado por meio de um ensaio adaptado [25]. Adicionaram-se 50 mL de água deionizada a 5 g de ARC previamente seco em estufa a (105 ± 5) °C. A mistura foi submetida à agitação por 5 minutos, seguida de um período de repouso de 30 minutos para o equilíbrio do sistema. Em seguida, realizou-se a medição do pH utilizando um pHmetro digital de bancada microprocessado, com faixa de medição de 0 a 14 pH e resolução de 0,001 pH, durante 5 minutos, até a estabilização das leituras.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas derivadas (DTG) das areias recicladas de concreto, com teores de umidade de 6%, 12% e 18% submetidas à carbonatação acelerada por tempos de exposição de 0,5 h, 2 h e 24 h, juntamente com a ARC não carbonatada (ARC-NC) são apresentadas na Figura 3.

Figura 3: DTG das areias recicladas de concreto (ARC) (%) submetidas a diferentes tempos de exposição e diferentes teores de umidade: 6% de umidade (à esquerda acima); 12% de umidade (à direita acima) e 18% de umidade (à esquerda abaixo)



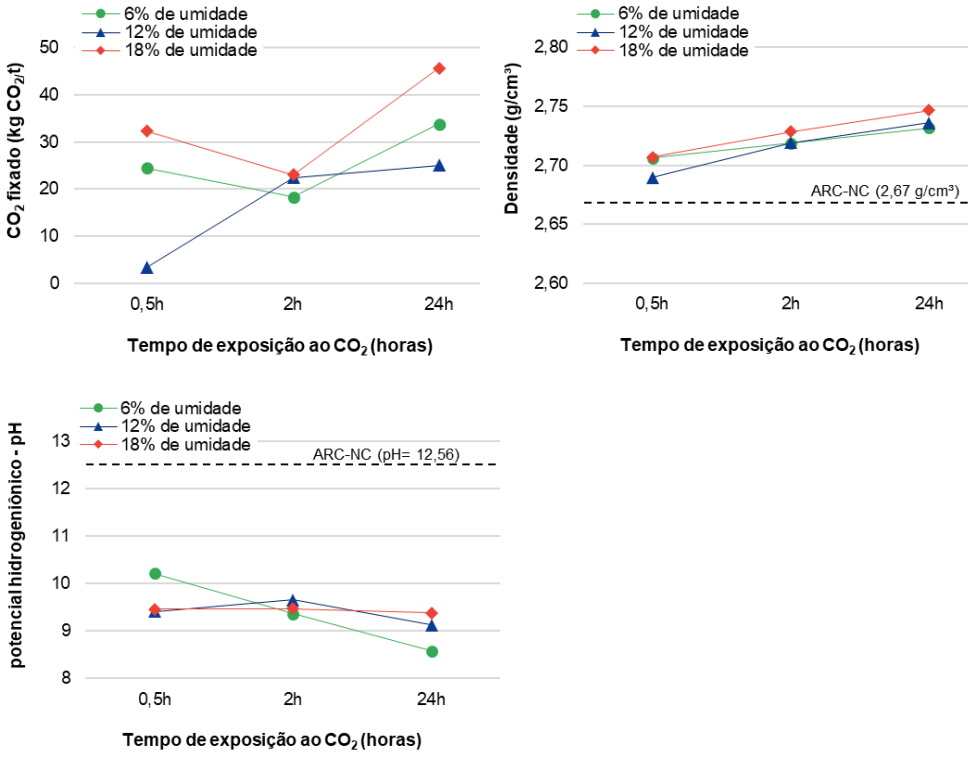
Fonte: os autores.

Observam-se, nas curvas DTG (%), três principais estágios de perda de massa (1, 2 e 3). O estágio inicial (1), até aproximadamente 200 °C, está associado à decomposição da etringita (AFt) e o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).O estágio (2), entre 400 °C e 450 °C, corresponde à decomposição da portlandita ($Ca(OH)_2$), enquanto o estágio (3), entre 600 °C e 800 °C, refere-se à decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) [26].

Com exceção da umidade 6% (Figura 3, à esquerda acima), o pico correspondente ao $Ca(OH)_2$ é significativamente reduzido após 0,5 h de exposição ao CO_2, indicando que a portlandita foi praticamente consumida durante o processo de carbonatação. Além do consumo do $Ca(OH)_2$, a descalcificação do C- S- H contribui para a precipitação de $CaCO_3$ [27]. Para a umidade de 12% (Figura 3, à direita acima), observou-se, em 2 h de exposição, um evento térmico na faixa de 530–570 °C, compatível com a decomposição de carbonatos de cálcio de menor estabilidade térmica e menor cristalinidade, possivelmente associados à formação de vaterita durante a carbonatação de fases C-S-H. Esse comportamento pode estar relacionado à disponibilidade de água, que favorece a ocorrência concomitante de processos de hidratação e carbonatação, potencialmente contribuindo para a formação desses produtos [28].

Os valores de CO_2 fixado, densidade e pH das areias recicladas de concreto são apresentados na Figura 4. Observa-se (Figura 4, à direita acima), que a fixação de CO_2 nas partículas de areia reciclada de concreto variou entre 3,47 e 45,58 kg CO_2/t, evidenciando a influência combinada do teor de umidade e do tempo de exposição ao CO_2 sobre a mineralização. No projeto FastCarb, foram reportadas valores entre 25 e 39 kg CO_2/t para areias recicladas submetidas à carbonatação rolante durante aproximadamente 1 h [29].

Figura 4: Fixação de CO_2 em areias recicladas de concreto e caracterização físico-química em diferentes tempos de exposição e teores de umidade: CO_2 fixado (à esquerda acima); densidade (à direita acima) e pH (à esquerda abaixo)



Fonte: os autores.

Entre 0,5 e 2 h de exposição (Figura 4, à direita acima), observou-se comportamento distinto em função do teor de umidade. Nas condições de 6% e 18% de umidade, correspondentes aos menores e maiores teores de água avaliados, respectivamente, Entre 0,5 e 2 h, observou-se redução da fixação de CO_2 nas condições de 6% e 18% de umidade, de 24,46 para 18,29 kg CO_2/t e de 32,27 para 23,01 kg CO_2/t, respectivamente. Em contraste, para 12% de umidade, a fixação aumentou de 3,47 para 22,41 kg CO_2/t entre 0,5 e 2 h, mantendo tendência de aumento até 24 h, quando atingiu 25,00 kg CO_2/t, o que pode estar associado a uma disponibilidade de água mais favorável à interação do CO_2 com as fases potencialmente carbonatáveis [30].

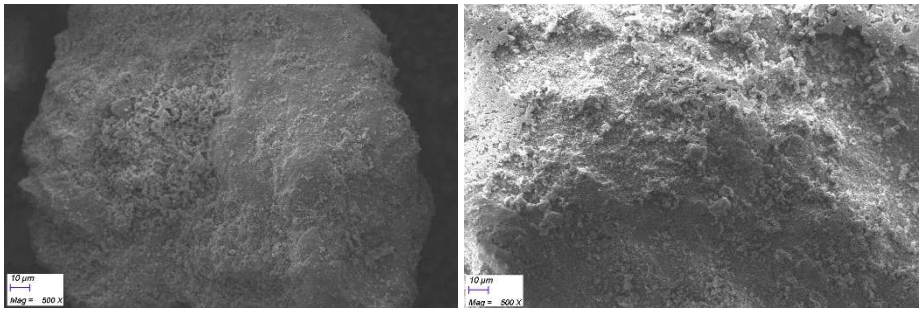
Entre as condições avaliadas, a umidade de 18% apresentou o maior valor de fixação de CO_2, atingindo 45,58 kg CO_2/t após 24 h de exposição. Em todas as condições de umidade, os maiores valores de fixação foram obtidos após 24 h, indicando que períodos mais prolongados favoreceram a continuidade da carbonatação e a formação de produtos carbonatados [31].

Para todas as condições de mineralização (Figura 4, à direita acima), observou-se aumento da densidade em relação à amostra não carbonatada (ARC-NC), de 2,67 g/cm³, com valores entre 2,69 e 2,75 g/cm³ após a carbonatação, sendo o maior obtido para ARC-18%-24h. Esse aumento pode estar associado à formação de produtos de carbonatação e ao preenchimento parcial de poros e microfissuras da pasta de cimento aderida às partículas [32].

Paralelamente, verificou-se (Figura 4, à esquerda abaixo) redução do pH de 12,56, observado para a amostra não carbonatada (ARC-NC), para valores entre 8,58 e 10,22 após a mineralização, indicando redução da alcalinidade do material durante a exposição ao CO_2 [33]. Entretanto, essa redução não apresentou relação diretamente proporcional à quantidade de CO_2 fixado. Por exemplo, para 6% de umidade, o pH reduziu de 10,22, em 0,5 h, para 9,36, em 2 h, e 8,58, em 24 h, enquanto a fixação de CO_2 foi de 24,46, 18,29 e 33,78 kg CO_2/t, respectivamente. Assim, embora a redução do pH indique alterações na alcalinidade decorrentes da carbonatação, essa variável não permite, isoladamente, quantificar o CO_2 fixado nem determinar o grau de consumo da portlandita [34].

A morfologia superficial das areias recicladas de concreto é apresentada na Figura 5, sendo a amostra não carbonatada (ARC-NC) mostrada (à esquerda) e a amostra mineralizada (ARC-18%-24h) (à direita). Observa-se que a superfície da amostra mineralizada se encontra praticamente recoberta pelos produtos da carbonatação, os quais, manifestam-se predominantemente na forma de calcita mal cristalizada [35].

Figura 5: Morfologia superficial das amostras obtida por MEV, com aumento de 500× (à esquerda), amostra não carbonatada (ARC-NC) e (à direita) amostra carbonatada com 18% de umidade por 24 h (ARC-18%-24h)



Fonte: os autores.

CONCLUSÕES

Conclui-se que a mineralização acelerada com CO_2 promoveu alterações nas propriedades físico-químicas das areias recicladas de concreto, evidenciadas pelo aumento da densidade, pela redução do pH e pela formação de produtos de carbonatação. Entre as condições avaliadas, a combinação de 18% de umidade e 24 h de exposição apresentou a maior fixação de CO_2, atingindo 45,58 kg CO_2/t.

Os resultados indicam que a eficiência da mineralização depende da interação entre o teor de umidade e o tempo de exposição, não apresentando comportamento linear em todas as condições. Dessa forma, a carbonatação acelerada apresenta potencial para a valorização de areias recicladas de concreto e para a incorporação permanente de CO_2 na forma de carbonatos, contribuindo para estratégias de economia circular e descarbonização do setor da construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Mineromix pela doação dos concretos; ao Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu (LTCI), à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) e ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) pelo suporte laboratorial; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Processo 403666/2025-2 pelo suporte ao projeto, pela bolsa IC-Af; ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), pela bolsa PIBIC-Jr; e ao Programa Institucional de Apoio ao Pesquisador (PIAP), pelo apoio ao desenvolvimento das atividades de pesquisa.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou o ChatGPT (OpenAI) para apoio à redação e revisão ortográfica, e o Grammarly para revisão gramatical e conferência da redação em inglês. Todo o conteúdo foi posteriormente revisado, editado e validado pelos autores, que assumem integral responsabilidade pela versão final do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] N.L. Abreu, E.S. da Cruz Ribeiro, C.E.S. de Sousa, L. Maués Moraes, J.V.C. de Oliveira, L. de Abreu Faria, A. Cláudia Ruggieri, A. da Silva Cardoso, C. Faturi, A.C. do Rêgo, T.C. da Silva, Land use change and greenhouse gas emissions: an explanation about the main emission drivers, Cienc. Anim. Bras. 25 (2024). https://doi.org/10.1590/1809-6891v25e-77646E.

[2] IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate change 2023. Synthesis Report, Contrib. Work. Groups I, II III to Sixth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang. [Core Writ. Team, H. Lee J. Romero (Eds.)]. (2023) 1–34. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

[3] United Nations Environment Programme, Global Status Report for Buildings and Construction 2025–2026: As climate risks rise and cities grow, we must rethink how we build to create better lives for all, Paris, 2026. https://www.unep.org/resources/report/global-status- report-buildings-and-construction-2025-2026.

[4] K. Kaptan, S. Cunha, J. Aguiar, A Review: Construction and Demolition Waste as a Novel Source for CO2 Reduction in Portland Cement Production for Concrete, Sustain. 16 (2024). https://doi.org/10.3390/su16020585.

[5] A. Marmier, Decarbonisation options for the Cement Industry, Publ. Off. Eur. Union. (2023) 63. https://doi.org/10.2760/174037.

[6] Associação Brasileira de Cimento Portland, Roadmap NET ZERO: Vision of the Brazilian Cement Industry to achieve emissions neutrality throughout its lifecycle by 2050, (2025).

[7] J. Monteiro, S. Roussanaly, CCUS scenarios for the cement industry: Is CO2utilization feasible?, J. CO2 Util. 61 (2022) 102015. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102015.

[8] M. Fernández Bertos, S.J.R. Simons, C.D. Hills, P.J. Carey, A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO2, J. Hazard. Mater. 112 (2004) 193–205. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.04.019.

[9] X. Hu, P. He, C. Shi, Carbonate binders: Historic developments and perspectives, Cem. Concr. Res. 175 (2024) 107352. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107352.

[10] C.S. Poon, P. Shen, Y. Jiang, Z. Ma, D. Xuan, Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review, Cem. Concr. Res. 173 (2023) 107284. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107284.

[11] G.S. Dos Reis, B.G. Cazacliu, R. Artoni, J.M. Torrenti, Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process, J. CO2 Util. 39 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101181.

[12] K.D.B. de S. Risson, P.R.S. Bittencourt, K.R. de F. Zara, E. Possan, Accelerated carbonation of construction waste powders: A circular economy strategy for CO_2 mitigation in cementitious materials, Case Stud. Constr. Mater. 24 (2026). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2026.e06042.

[13] J.M. Torrenti, O. Amiri, L. Barnes-davin, S. Braymand, B. Cazacliu, J. Colin, A. Cudeville, P. Dangla, A. Djerbi, M. Doutreleau, A. Feraille, M. Gueguen, X. Guillot, Y. Hou, L. Izoret, Y. Jacob, J. Jeong, J. David, L. Hiu, P. Mahieux, J. Mai-nhu, H. Martinez, V. Meyer, V. Morin, T. Pernin, J. Potier, L. Poulizac, P. Rougeau, M. Saad, L. Schmitt, T. Sedran, M. Sereng, A. Soive, G. Symoes, D. Reys, P. Turcry, The FastCarb project : Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates, Case Stud. Constr. Mater. 17

(2022). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01349.
[14] Z. Zhang, U. Angst, V. Troian, B. Guo, Q. Zeng, Durability performance of concrete incorporating carbonated recycled coarse aggregates: a review, Npj Mater. Sustain. 3 (2025) 1–12. https://doi.org/10.1038/s44296-025-00071-x.
[15] Y. Pu, L. Li, Q. Wang, X. Shi, C. Luan, G. Zhang, L. Fu, A. El-Fatah Abomohra, Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review, Constr. Build. Mater. 282 (2021) 122671. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122671.
[16] A.K. Shuvo, P.K. Sarker, F.U.A. Shaikh, Efficacy of various accelerated carbonation techniques to improve recycled concrete aggregates: A comprehensive review, J. Build. Eng. 95 (2024) 110257. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110257.
[17] T. Zhang, M. Chen, Y. Wang, M. Zhang, Roles of carbonated recycled fines and aggregates in hydration, microstructure and mechanical properties of concrete: A critical review, Cem. Concr. Compos. 138 (2023). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104994.
[18] ABNT, NBR 7215: Cimento Portland - Determinção da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, (2019).
[19] C. Ulsen, H. Kahn Associado, S.C. Angulo, V.M. John Associado, Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo (Chemical composition of mixed construction and demolition recycled aggregates from the State of São Paulo), Mineração. 63 (2010) 339–346.
[20] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, CRC Press - Taylor e Francis Group, London, 2016. https://doi.org/10.1201/b19074.
[21] A. Neves Junior, J. Dweck, R.D.T. Filho, B. Ellis, V. Li, Determination of CO2 capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry, J. Therm. Anal. Calorim. 138 (2019) 97–109. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08210-y.
[22] D.R.B. Oliveira;, M.P. Proença, K.D.B. de S. Risson, A. Neves Junior, J. Marques Filho, Optimized cementitious matrices with activated CDW fines : A sustainable path to low carbon cement, 483 (2025). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141719.
[23] D.R.B. Oliveira, G. Leite, E. Possan, J. Filho, Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production, Constr. Build. Mater. 397 (2023). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132382.
[24] ABNT ISO, NBR ISO 12154 - Determinação da densidade por deslocamento volumétrico — Densidade-esqueleto por picnometria a gás, (2022) 15–25. www.abnt.org.br.
[25] P.C. Teixeira, G.K. Donagemma, A. Fontana, W.G. Teixeira, Manual de Métodos de Análise de Solo, 2017. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1087312/1/Pt2Cap1pHdosolo.pdf.
[26] H. Sousanabadi Farahani, A. Hosseini Zadeh, J. Hu, C. Hawkins, S. Kim, Carbonation reaction of recycled concrete aggregates (RCA): CO2 mass consumption under various treatment conditions, Clean. Mater. 15 (2025) 100296. https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100296.
[27] X. Ouyang, X. Li, J. Li, Y. Ma, M. Zhang, Z. Li, J. Fu, Multiscale microstructure and reactivity evolution of recycled concrete fines under gas-solid carbonation, Cem. Concr. Compos. 157 (2025) 105903.

https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105903.

[28] N. Vogler, P. Drabetzki, M. Lindemann, H.C. Kühne, Description of the concrete carbonation process with adjusted depth-resolved thermogravimetric analysis, J. Therm. Anal. Calorim. 147 (2022) 6167–6180. https://doi.org/10.1007/s10973-021-10966-1.

[29] L. Izoret, T. Pernin, J.M. Potier, J.M. Torrenti, Impact of Industrial Application of Fast Carbonation of Recycled Concrete Aggregates, Appl. Sci. 13 (2023). https://doi.org/10.3390/app13020849.

[30] L. Wu, W. Zhang, H. Jiang, X. Ju, L. Guan, H. Liu, S. Chen, Synergistic Effects of Environmental Relative Humidity and Initial Water Content of Recycled Concrete Aggregate on the Improvement in Properties via Carbonation Reactions, Materials (Basel). 16 (2023). https://doi.org/10.3390/ma16155251.

[31] L. Li, N. Ziyabek, Y. Jiang, J. Xiao, C.S. Poon, Effect of carbonation duration on properties of recycled aggregate concrete, Case Stud. Constr. Mater. 19 (2023) e02640. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02640.

[32] E.S. Poojalakshmi, A.C. Shaju, P. Nagarajan, J. Sudhakumar, B.S. Thomas, S. Das, M.A. Berhe, Optimization of carbonation parameters for recycled fine aggregate utilizing the Taguchi method and absorbent-assisted treatment, Sci. Rep. 16 (2026) 1–21. https://doi.org/10.1038/s41598-026-49464-5.

[33] J. Park, J. Lee, C.W. Chung, S. Wang, M. Lee, Accelerated carbonation of recycled aggregates using the pressurized supercritical carbon dioxide sparging process, Minerals. 10 (2020). https://doi.org/10.3390/min10060486.

[34] S.A. Bernal, U.M. Angst, J.L. Provis, C. Thiel, G.J.G. Gluth, Y. Villagran-Zaccardi, N. De Belie, Recommendation of RILEM TC 281-CCC: RILEM CPC-18R1—guideline for measuring the carbonation depth of hardened concrete using a pH indicator solution, Mater. Struct. Constr. 59 (2026) 1–11. https://doi.org/10.1617/s11527-026-02966-0.

[35] Y. Gao, Y. Jiang, Y. Tao, P. Shen, C.S. Poon, Cement and Concrete Research Accelerated carbonation of recycled concrete aggregate in semi-wet environments : A promising technique for CO 2 utilization, Cem. Concr. Res. 180 (2024) 107486. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107486.