

MINERALIZAÇÃO DE CARBONO EM PÓS RECICLADOS DE CONCRETO COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS E USO COMO SUBSTITUTO AO CIMENTO PORTLAND

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.VII-017>

Kathleen Dall Bello de Souza Risson*, Melissa Pastorini Proença, Dayana Ruth Oliveira Pruner, Kátya Regina de Freitas Zara, Edna Possan.

* Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade – PPGIES/ UNILA - Universidade Federal da Integração Latino-Americana; kathleen.risson@gmail.com

RESUMO

Este trabalho investiga o potencial de fixação de carbono de pós reciclados de concretos visando o uso como material cimentício suplementar (MCS's) ao cimento Portland. Corpos de prova de concreto foram processados em máquina de abrasão Los Angeles por 2 horas e o material foi peneirado na malha 0,15 mm, gerando o Pó Reciclado de Concreto (PRC). Para a obtenção de granulometria similar ao cimento, o PRC foi cominuído em moinho de bolas planetário, gerando o PRC_C. Os pós foram submetidos à mineralização por carbonatação acelerada por 2h, 8h e 24h nas condições: temperatura de 20 ± 2 °C, umidade relativa de $70 \pm 10\%$ e taxa de CO_2 de 15%. A fixação de carbono nos pós foi quantificada por termogravimetria (TG). O uso dos pós mineralizados foi avaliado conforme a NBR 7215 pelo método de determinação da resistência à compressão de argamassas, considerando 25% de substituição do cimento Portland. Verificou-se que os pós reciclados de concreto têm potencial para fixar carbono entre 1,8 a 13 kg. CO_2 /ton de material, sendo que quanto menor o tamanho da partícula, mais rápida foi a fixação de carbono. Em relação à resistência à compressão, foram obtidos valores entre 25 e 33 MPa aos 28 dias, variações influenciadas pela granulometria do pó, pelo tempo de exposição e pela interação entre essas duas variáveis (p -valor $< 0,05$). Para o mercado de carbono, o pó reciclado de concreto deve ser reconhecido como um valioso fixador de carbono, com potencial de contribuir de maneira eficaz para a redução das emissões de gases de efeito estufa na indústria cimenteira.

PALAVRAS-CHAVE: Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono; Material cimentício suplementar; Mercado de carbono.

ABSTRACT

This work investigates the carbon fixation potential of recycled concrete powders for use as a supplementary cementitious material (SCM) to Portland cement. Concrete specimens were processed in a Los Angeles abrasion machine for 2 hours and the material was sieved through a 0.15 mm mesh, generating Recycled Concrete Powder (CRP). To obtain a granulometry similar to cement, the CRP was comminuted in a planetary ball mill, generating the PRC_C. The powders were subjected to mineralization by accelerated carbonation for 2h, 8h, and 24h under the following conditions: temperature of 20 ± 2 °C, relative humidity of $70 \pm 10\%$, and CO_2 rate of 15%. Carbon fixation in the powders was quantified by thermogravimetry (TG). The use of the mineralized powders was evaluated according to NBR 7215 by the method for determining the compressive strength of mortars, considering 25% replacement of Portland cement. It was found that recycled concrete powders have the potential to fix carbon at between 1.8 and 13 kg. CO_2 /ton of material, the smaller the particle size, the faster the carbon fixation. Regarding compressive strength, values of between 25 and 33 MPa were obtained at 28 days, with variations influenced by the particle size of the powder, the length of time it had been in use, and the amount of time it had been in use. For the carbon market, recycled concrete dust should be recognized as a valuable carbon sequester, with the potential to effectively contribute to reducing greenhouse gas emissions in the cement industry.

KEY WORDS: Carbon Capture, Utilization and Storage; Supplementary cementitious material; Carbon market.

INTRODUÇÃO

A mineralização do CO_2 é um processo natural ou industrial que envolve a reação química entre o dióxido de carbono (CO_2) com minerais contendo metais alcalinos-terrosos como magnésio (Mg) e cálcio (Ca) para formar carbonatos estáveis e insolúveis. Durante a vida útil dos materiais cimentícios como argamassas e concreto, esse processo pode demorar décadas (CAMPOS NETO *et al.*, 2023). Para antecipar as reações, são utilizados ensaios acelerados onde se aumenta a concentração de CO_2 . Duas rotas são possíveis: a cura carbônica, uma técnica que envolve a exposição do concreto nas idades iniciais ao CO_2 , e usada geralmente em pré-fabricados e a mineralização de agregados reciclados de concreto em câmaras de carbonatação acelerada.

A mineralização de agregados reciclados de concreto vem sendo investigado extensivamente, uma vez que o processo além ser considerada uma tecnologia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (em inglês *Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS*) (ZAJAC *et al.*, 2023), é visto como uma alternativa promissora para a economia circular no setor da construção civil, pois esse processo promove o aprimoramento das partículas pela redução da porosidade, potencializando seu uso (ANTUNES *et al.*, 2022).

Recentemente, tem-se observado um crescente interesse na mineralização de pós provenientes de fornos de cimento, lama de concreto, pastas de cimento e pós reciclados de concreto devido à sua composição química rica em CaO e maior área de superfície específica, em comparação aos agregados, e que pode contribuir para a ampliação da fixação de carbono (ZHANG *et al.*, 2023). No entanto, o processo de mineralização é complexo, pois envolve diferentes condições de exposição como: teor de CO_2 , umidade relativa e temperatura; condições para a difusão do CO_2 , as características do material a ser mineralizado como a reserva alcalina, o sistema de poros, as dimensões das partículas (TORRENTI *et al.*, 2022) e o preparo da amostra (ZAJAC *et al.*, 2022).

OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de fixação de carbono em pós reciclados de concreto com diferentes granulometrias e o desempenho quando usados como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS's) ao cimento Portland.

METODOLOGIA

Obtenção dos pós reciclados de concreto

Os pós reciclados de concreto (PRC) foram obtidos do processamento em máquina de Abrasão de Los Angeles por 2 horas de corpos de prova de concreto usados no controle tecnológico de usina de pré-moldados e concreto usinado, com diferentes composições. A fração obtida foi peneirada, e o material passante na peneira Mesh 100 ($<0,15 \text{ mm}$) foi utilizado.

Para obter uma fração granulométrica similar ao cimento Portland, em bateladas de 60 g, o PRC foi cominuído (PRC_C) por 0,5 horas em moinho de bolas planetários PM 100 (Retsch) com rotação de 500 rpm e inversão automatizada de sentido na rotação a cada 15 min com parada de 1 minuto para desaquecimento. Para auxiliar o processo, utilizou-se 50 esferas de ágata de diâmetro aproximado de 10 mm. O processamento para a obtenção das duas granulometrias de pós é ilustrado na Figura 1.



Figura 1: Processamento de moagem de resíduos de concreto. Fonte: Autores, 2025.

A distribuição do tamanho de partículas dos pós reciclados e do cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) que foi usado como ligante para a preparação das argamassas e avaliação do desempenho dos pós após a mineralização do CO₂, foi avaliada em analisador a laser (Cilas 1190), com faixa de leitura entre 0,04 e 2500 µm, em meio líquido (água destilada), sem a presença de dispersante e com índice de obscuração de aproximadamente 25% é ilustrada na Figura 2.

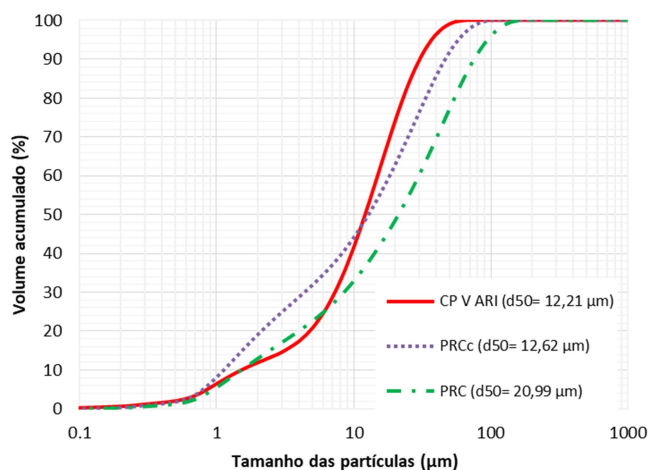


Figura: Curvas granulométrica dos materiais. Fonte: Autores, 2025.

Verifica-se (Figura 2) que o diâmetro pelo qual passam 50% das partículas (d₅₀) do PRCc é menor que o PRC e similar ao CP V ARI, indicativo da eficiência do processamento ilustrado na Figura 1. O uso de pós reciclados como MCS's com d₅₀ iguais ou menores que o cimento melhora os efeitos químicos (reatividade) e físicos (empacotamento de partículas).

A Tabela 1 mostra as composições de óxidos dos pós e do cimento determinados por Fluorescência de Raios-X (FRX) em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. Para análise dos elementos maiores, a calibração foi realizada com o pacote *GeoQuant T®* da Bruker composto por padrões de rochas e minerais naturais. O cimento Portland composto por até 25% de material carbonático (CP II F 32) foi utilizado para fins de comparação com o desempenho mecânico dos pós reciclados quando usados como MCS's em argamassas.

Tabela 1: Composição de óxidos de pós e cimentos. Fonte: Autores, 2025.

Materiais	Composição química (%)										
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	PF
CP II F	19,20	54,05	4,50	2,61	5,25	0,61	2,45	0,15	<LQ	<LQ	10,54
CP V ARI	19,85	60,84	4,88	2,66	1,83	0,54	3,58	0,19	0,11	0,23	5,64
PRC e PRC _C	47,20	21,36	8,56	6,94	3,28	2,14	0,62	1,36	0,13	0,22	7,84

PF: Perda ao Fogo; <LQ: Abaixo do Limite Quantificável.

Verifica-se (Tabela 1) que os pós reciclados de concreto possuem maiores quantidades de sílica (SiO₂) que os cimentos, o que pode ser justificado pela maior presença respectivamente de areia natural e de compostos cimentícios hidratados (concretos, argamassas). A Perda ao Fogo (PF) está relacionada, principalmente, à presença de pasta endurecida de cimento nos agregados (fases portadoras de CaO) e de filossilicatos provenientes de argilominerais (OLIVEIRA *et al.*, 2023). O teor do óxido de ferro presente nos pós reciclados de concreto se deve a presença do pó de pedra de origem basáltica na composição dos concretos (THOMAZ; MIYAJI; POSSAN, 2021).

Mineralização de CO₂ nos pós e caracterização

Os pós foram dispostos em camadas de aproximadamente 20 mm na câmara climatizada da marca BASS, modelo UUC-RH-STD-CO2-1000/2016. Adotou-se a temperatura de 23 ± 2 °C, umidade relativa de 60 ± 10% e taxa de CO₂ de 15% (150.000 ppm), que é a mesma concentração dos gases do forno de cimento (TORRENTI *et al.*, 2022). Após a exposição por 2h, 8h e 24h, os pós foram secos (40°C) até constância de massa.

Verificou-se a mineralização e fixação de CO_2 nos pós através da diferença de massa entre os perfis termogravimétricos (TG/DTG) dos pós carbonatados (CA) e não carbonatados (NC) onde ocorre a decomposição do carbonato de cálcio (500-800°C) (FONTOLAN *et al.*, 2024; NEVES JUNIOR *et al.*, 2014). Cerca de 10 mg dos pós foram colocados em cadinhos de alumina em um analisador PerkinElmer, modelo STA 6000, com um fluxo de nitrogênio de 20 mL.min⁻¹, intervalo de aquecimento de 100°C a 900°C e taxa de aquecimento do equipamento de 20°C.min⁻¹. Com auxílio do programa OriginPro 8.5 as curvas TG e termogravimetria derivada (DTG) dos pós foram plotadas em percentuais de massa (Figura 3).

Assim, com as perdas de massa relativa a descarbonatação, estimou-se a fixação de CO_2 em porcentagem da massa da amostra seca a ~105°C e em (kg. CO_2 /t) pelas equações 1 a 2. Admitiu-se a massa molar do CO_2 (MM_{CO_2}) ~ 44 g/mol.

$$CO_{2,fixação}(\%) = \frac{(TG_{CA}^1 - TG_{CA}^2) - (TG_{NC}^3 - TG_{NC}^4) \times MM_{CO_2}}{\text{massa da amostra (105°C)}} \times 100 \quad \text{equação (1)}$$

$$CO_{2,fixação}(\text{kg. } CO_2 / \text{t}) = \frac{CO_{2,TG_CA} - CO_{2,TG_NC}}{100} \times 1000 \quad \text{equação (2)}$$

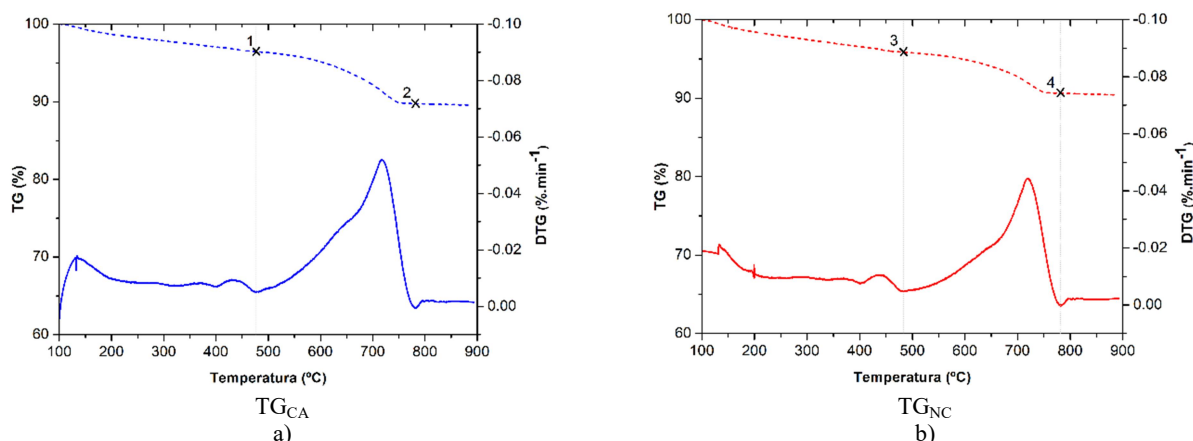


Figure 3: Exemplo de perfis TG/DTG dos pós RCP e pontos de extração de dados: a) CA-8h; b) NC. Fonte: Autores, 2025.

Cada amostra foi analisada separadamente, não assumindo uma mesma temperatura de decomposição para todas as amostras.

Aplicação dos pós como MCS's

A aplicação dos pós antes e após a mineralização por carbonatação acelerada se deu em argamassas, preparadas e moldadas conforme os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Para o traço em massa 1:3 (cimento: areia normal) e relação água/cimento igual a 0,48, foi substituído 25% da massa do CP V ARI pelos pós reciclados. A areia normal possuía as faixas granulométricas #16 (1,18 mm), #30 (0,60 mm), #50 (0,30 mm) #100 (0,150 mm).

A resistência à compressão foi determinada aos 28 dias, em prensa hidráulica (modelo I-3025-B), com velocidade de carga de 0,15 ± 0,05 MPa/s, tomando-se a média de 3 corpos de prova cilíndricos (50 mm × 100 mm) curados em água de cal saturada (3g/l). Os resultados foram analisados por meio do Software SISVAR (FERREIRA, 2011) e submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05 (p-valor <0,05 há diferença significativa entre as médias).

RESULTADOS

As curvas TG/DTG dos pós reciclados antes e após a mineralização por carbonatação acelerada são mostradas na Figura 4 a e b para as duas granulometrias, PRC e o PRC_C (cominuído) respectivamente.

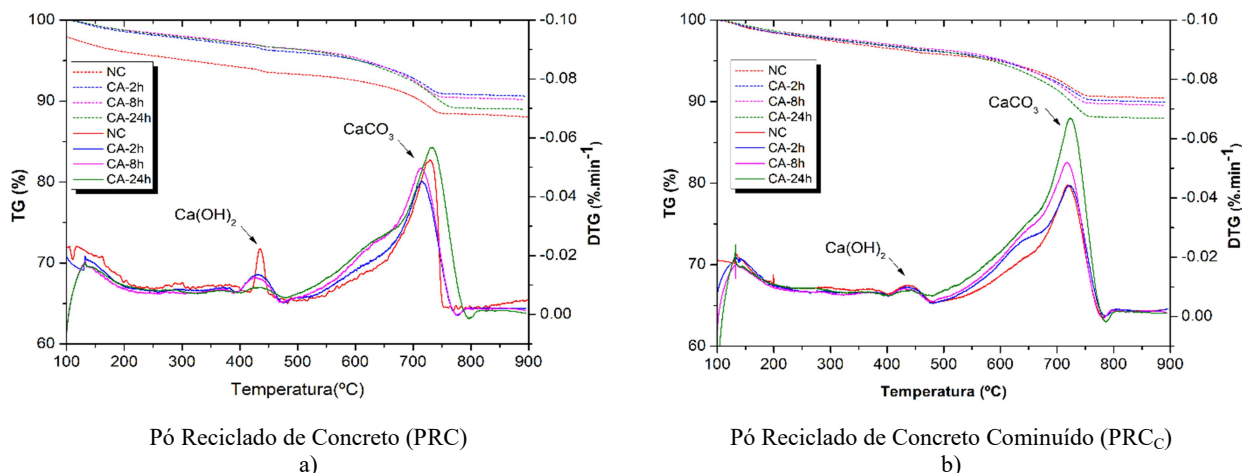


Figure 4: Perfis TG/DTG dos pós antes e após a mineralização a) PRC; b) PRCc. Fonte: Autores, 2025.

Analisando os perfis TG/DTG, verifica-se nas amostras carbonatadas (CA) por 2h, 8h e 24h que houve uma perda de massa entre 400-480 °C, correspondendo à decomposição de Ca(OH)_2 (Portlandita). Comparando com as amostras não carbonatadas (NC), uma perda de massa mais acentuada foi observada nas curvas DTG dos pós carbonatados na faixa de temperatura de 500-800°C devido à descarbonatação do CaCO_3 (MAO *et al.*, 2023), indicando a mineralização e fixação de CO_2 . Qualitativamente, observa-se que durante o manuseio e cominuição do PRC, ocorreu uma pré-carbonatação dos pós, visto que a perda de massa relativa ao Ca(OH)_2 é menor no PRCc quando comparado ao PRC. Com a diminuição do tamanho das partículas (PRCc), a reação do CO_2 com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e outros partículas não hidratadas presentes no pó podem ter contribuído com a maior fixação de CO_2 em comparação com o PRC.

Os resultados da fixação de CO_2 em $\text{kg.CO}_2/\text{t}$ de pó reciclado de concreto, obtido por meio da equação 2 é ilustrado nas Figuras 5 a, enquanto na Figura 5 b, são mostrados os resultados da resistência à compressão quando substituído 25% do cimento pelos pós reciclados com carbono fixado.

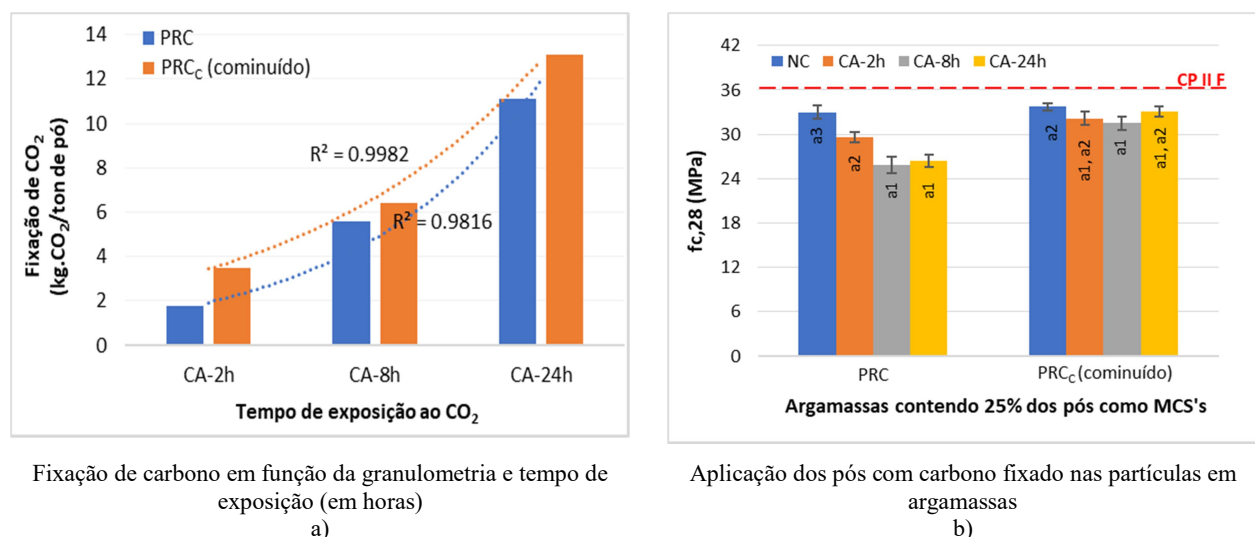


Figura 5: Pós reciclados de concreto: a) Valores fixados de CO_2 ; b) Resistência à compressão das argamassas. Fonte: Autores, 2025.

Observa-se (Figura 5 a) que o pó reciclado de concreto (PRC) apresentou uma fixação de carbono entre 1,8 a 11 $\text{kg.CO}_2/\text{ton}$ de pó, enquanto o PRC cominuído por 30 minutos (PRCc) valores superiores, entre 3,5 a 13,10 $\text{kg.CO}_2/\text{ton}$ de pó durante o mesmo período de exposição. Ambas as partículas apresentando uma correlação exponencial entre a fixação de carbono e o tempo de exposição ao CO_2 . Os resultados sugerem que os pós cominuídos (PRCc) devido a maior área superficial exposta ao CO_2 , tendem a fixar uma quantidade de CO_2 por tonelada do material que os pós de

referência (PRC). Na literatura os valores encontrados para pós reciclados de concreto variaram entre 0,30 a 28,10 kg.CO₂/ton (KALIYAVARADHAN; LI; LING, 2022).

Em relação ao desempenho dos pós com carbono fixado nas partículas (CA), observa-se que, em comparação com os pós não carbonatados (NC), houve uma redução nos valores da resistência à compressão aos 28 dias (f_{c,28}) das argamassas contendo 25% do material substituindo ao cimento Portland, sendo essa redução menos pronunciada para o PRC_C (cominuído), com valores inferiores a 7%, enquanto para o PRC a redução chegou a aproximadamente 22% (CA-8h).

Esses resultados indicam que embora as partículas tenham fixado carbono, para melhorar sua performance como MCS's, devido a formação da sílica gel, conforme relatado na literatura (OUYANG *et al.*, 2020), são necessários estudos de otimização, tais como o aumento da temperatura (WU *et al.*, 2022), pré-hidratação das partículas entre outras abordagens usadas como processos dinâmicos e gás/líquido.

Para o uso como MCS's menores teores de substituição podem ser avaliados, visto que todas as argamassas apresentaram valores inferiores ao CP II F 32 (≈36 MPa aos 28 dias). Estatisticamente a granulometria dos pós, o tempo de exposição e a interação entre os fatores influenciaram no desempenho dos pós quando usados como MCS's (p-valor <0,05), conforme indicado pelas letras diferentes na Figura 5b

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os pós reciclados de concreto têm potencial para fixar carbono entre 1,8 a 13 kg.CO₂/ton de material, sendo que quanto menor o tamanho da partícula (maior área exposta ao CO₂), maior foi a capacidade de fixação, embora seja limitado pela composição química do material.

Para uso dos pós reciclados de concreto mineralizado como Material Cimentício Suplementar ao cimento Portland, a eficiência do processo de mineralização por carbonatação acelerada e a escalabilidade ainda são questões que precisam ser resolvidas.

Por fim, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, o uso de pós reciclados de concreto no contexto do mercado de carbono é promissor, mas requer mais pesquisas, inovação e certificação para que seu verdadeiro potencial seja explorado.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) – campus Foz do Iguaçu, ao Laboratório de Tecnologia do Concreto Itaipu Binacional e à Mineromix concretos e pré-fabricados pelo apoio ao projeto experimental. À Juliana Abatti Stopassoli pelo apoio laboratorial. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2021 - Faixa B - Grupos Consolidados. À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação PRPPG/UNILA pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.
2. ANTUNES, M. et al. Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review. **Materials**, v. 15, n. 1, 2022.
3. CAMPOS NETO, T. F. et al. Efeito da temperatura na difusão efetiva do CO₂ nos materiais à base de cimento: uma abordagem com modelagem micromecânica. **Caderno Pedagógico**, v. 20, n. 6, p. 2292–2312, 2023.
4. FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
5. FONTOLAN, B. L. et al. CO₂ emissions and uptake in rendering mortars: sustainable approach. **Ambiente Construído**, v. 24, 2024.
6. KALIYAVARADHAN, S. K.; LI, L.; LING, T. C. Response surface methodology for the optimization of CO₂ uptake using waste concrete powder. **Construction and Building Materials**, v. 340, n. March

- 2023, 2022.
7. MAO, Y. et al. Effect of conditions on wet carbonation products of recycled cement paste powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 144, n. September, p. 105307, 2023.
 8. NEVES JUNIOR, A. et al. A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 116, n. 1, p. 69–76, 2014.
 9. OLIVEIRA, D. R. B. et al. Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production. **Construction and Building Materials**, v. 397, 2023.
 10. OUYANG, X. et al. Surface characterization of carbonated recycled concrete fines and its effect on the rheology, hydration and strength development of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, n. May, p. 103809, 2020.
 11. TORRENTI, J. M. et al. The FastCarb project: Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. July, 2022.
 12. WU, Y. et al. High-temperature CO₂ for accelerating the carbonation of recycled concrete fines. **Journal of Building Engineering**, v. 52, n. April, p. 104526, 2022.
 13. ZAJAC, M. et al. Semi-dry carbonation of recycled concrete paste. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 63, n. June, 2022.
 14. ZAJAC, M. et al. Enforced carbonation of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 174, n. March, 2023.
 15. ZHANG, T. et al. Roles of carbonated recycled fines and aggregates in hydration, microstructure and mechanical properties of concrete: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, 2023.