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.v21i1.8843

Avaliação do potencial de captura de CO_2 em argamassas de revestimento por meio de ensaios de carbonatação acelerada

Evaluation of CO_2 Capture Potential in Rendering Mortars Through Accelerated Carbonation Tests

Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura
UTFPR | Apucarana | Brasil | sarahh@utfpr.edu.br
Marcell Mariano Corrêa Maceno
UFPR | Curitiba| Brasil | marcell.maceno@gmail.com
Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
UFPR | Curitiba | Brasil | mariennemaron@gmail.com

Resumo

Este estudo investiga o potencial de captura de CO_2 em argamassas de revestimento via carbonatação acelerada, visando a mitigação de emissões no setor da construção. Diferente das estruturas de concreto armado, o fenômeno em argamassas é benéfico, promovendo o refinamento da matriz porosa e incremento da resistência mecânica via precipitação de $CaCO_3$. A metodologia baseou-se na produção de argamassas no traço 1:1:6 (cimento:cal:areia, em volume) utilizando cimento CP II F-32 e cal CH-III. As amostras foram expostas a uma câmara com concentração controlada de 5% de CO_2. A quantificação de carbono, realizada por análise elementar, demonstrou que as argamassas atingiram teores de carbono consistentes com o potencial teórico de absorção calculado (~4,1%). Observou-se que a argamassa de areia média atingiu o potencial máximo aos 28 dias, enquanto a de areia fina demandou 56 dias, evidenciando a influência da granulometria e permeabilidade na cinética do processo. Os resultados ratificam a eficácia dos ensaios acelerados para simular a capacidade máxima de sequestro de carbono, posicionando as argamassas de revestimento como sumidouros ativos de CO_2.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento. Carbonatação acelerada. Captura de CO_2

Abstract

This study investigates the CO_2 sequestration potential in rendering mortars through accelerated carbonation, aiming at mitigating emissions within the construction sector. Unlike in reinforced concrete structures, the phenomenon in mortars is beneficial, promoting pore matrix refinement and enhanced mechanical strength via $CaCO_3$ precipitation. The methodology was based on the production of mortars with a 1:1:6 mix proportion (cement:lime:sand, by volume) utilizing CP II F-32 cement and CH-III hydrated lime. The specimens were exposed to a chamber with a controlled 5% CO_2. Carbon quantification, performed via elemental analysis, demonstrated that the mortars reached carbon levels consistent with the calculated theoretical absorption potential (~4.1%). It was observed that the medium sand mortar reached maximum potential at 28 days, whereas the fine sand mortar required 56 days, highlighting the influence of grain size distribution and permeability on process kinetics. The results validate the effectiveness of accelerated tests in simulating maximum carbon sequestration capacity, positioning rendering mortars as active CO_2 sinks.

Keywords: Rendering mortar. Accelerated carbonation. CO_2 capture.

Como citar:
TAMURA, S.; MACENO, M.; COSTA, M. Avaliação do potencial de captura de CO2 em argamassas de revestimento por meio de ensaios de carbonatação acelerada. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8843

INTRODUÇÃO

A indústria do cimento é responsável por cerca de 10% das emissões globais de CO_2, o que impulsiona a busca por estratégias de mitigação e compensação. Entre os fenômenos físico-químicos que ocorrem nas matrizes cimentícias, a carbonatação destaca-se por sua dualidade.

A carbonatação é um processo físico-químico resultante da interação entre o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e os produtos de hidratação do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Em estruturas de concreto armado, esse fenômeno é classicamente tratado como deletério devido à redução do pH da matriz, que despassiva as armaduras e inicia processos [1]. Entretanto, em argamassas de revestimento, a carbonatação desempenha um papel benéfico ao promover o refinamento da estrutura de poros e o aumento da resistência mecânica por meio da precipitação de cristais de calcita ($CaCO_3$) [2][3].

O avanço da frente de carbonatação ocorre por difusão gasosa através dos poros interconectados. Conforme observado por Freitas et al. [4], a velocidade desse avanço em argamassas é significativamente superior à do concreto, devido à maior porosidade e à menor reserva alcalina dos traços usuais. Estudos indicam que, em camadas de 20 mm de espessura, a carbonatação total pode ocorrer em aproximadamente 200 dias sob condições naturais. A reação química é cíclica: o CO_2 dissolve-se na água dos poros formando ácido carbônico, que reage com os hidróxidos de cálcio, potássio e sódio. Este processo, além de consolidar a matriz cimentícia, atua como um sumidouro de carbono. De acordo com o modelo de Lagerblad [5], adaptado por Freitas Júnior et al. [6] para argamassas, o potencial de absorção é diretamente proporcional ao teor de CaO e MgO reativos presentes no cimento e na cal hidratada.

Conforme destacado por Freitas et al. [4], a carbonatação em argamassas promove o refinamento da estrutura de poros e o aumento das propriedades mecânicas, devido à precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Além do ganho de durabilidade, a capacidade dessas argamassas de absorver CO_2 da atmosfera ao longo de sua vida útil as posiciona como elementos ativos na estratégia de descarbonização da construção civil. Este estudo visa quantificar esse potencial de captura em condições aceleradas, fornecendo dados técnicos para a modelagem do ciclo de vida de edifícios sustentáveis.

MATERIAIS E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a composição das argamassas, utilizou-se cimento Portland composto com fíler calcário (CP II F-32), cal hidratada do tipo CH-III e areia natural de origem quartzosa em duas granulometrias distintas. As propriedades físicas e químicas dos aglomerantes e agregados foram determinadas seguindo as normas técnicas vigentes, conforme consolidado nas Tabelas 1, 2 e 3, bem como na Figura 1.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8843

Tabela 1: caracterização física dos materiais empregados nas misturas

Propriedade	Cimento CP II F-32	Cal CH-III	Areia Natural Fina	Areia Natural Média-Fina
Massa Específica (g/cm³)	3,05	2,45	2,55	2,63
Massa Unitária (g/cm³)	-	-	1,66	1,60
Superfície Específica (cm²/g)	3.717	-	-	-
Módulo de Finura	-	-	1,90	2,06
Diâmetro Máximo (mm)	-	-	2,36	2,36
Material pulverulento #200 (%)	-	-	4,19	3,75

Fonte: os autores.

Tabela 2: caracterização química do cimento

Óxidos	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	P_2O_5	K_2O	
%	44,960	18,654	14,875	7,571	5,000	2,895	2,654	2,310	
Óxidos	**CuO**	**TiO_2**	**Mn_2O_3**	**SrO**	**V_2O_3**	**ZnO**	**ZrO_2**	**Rb_2O**	**Y_2O_3**
%	0,329	0,306	0,286	0,075	0,032	0,026	0,015	0,008	0,003

Fonte: Laboratório de química da UNICENTRO.

Tabela 3: caracterização química da cal

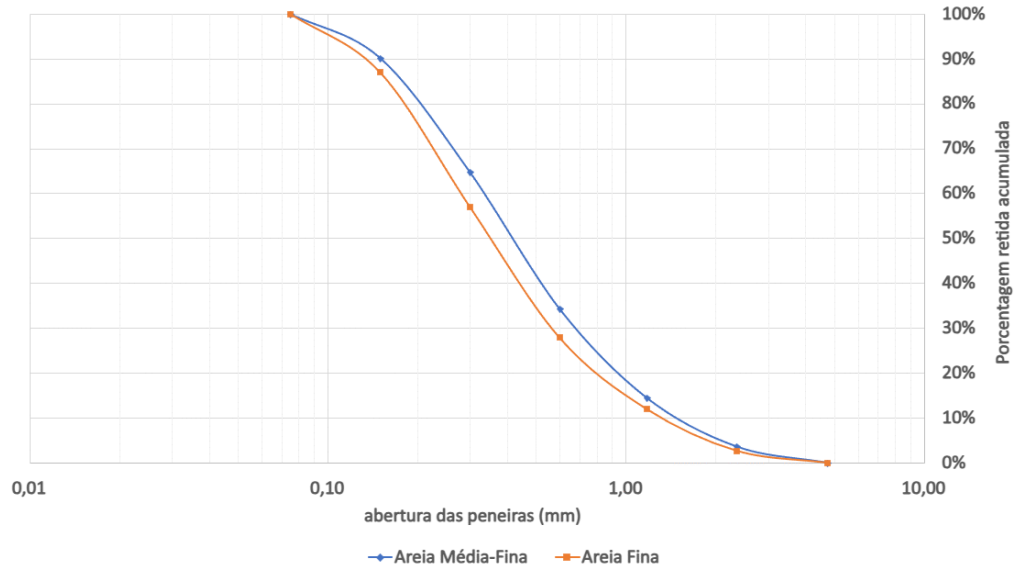
Óxidos	CaO	MgO	P_2O_5	SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	Mn_2O_3	CuO	SrO	NiO
%	51,920	43,268	3,266	0,934	0,275	0,258	0,048	0,017	0,011	0,002

Fonte: Laboratório de química da UNICENTRO.

Vale ressaltar que as areias foram cedidas por uma empresa de agregados naturais na região metropolitana de Curitiba onde são comercializadas como areia média e areia fina, respectivamente. No entanto, a caracterização das areias mostra que as duas areias são muito parecidas e, segundo a classificação de Bauer [7], devido aos seus módulos de finura, ambas são areias finas. Mesmo assim, optou-se por analisar as argamassas com o emprego das duas em separado e por verificar a influência no desempenho das misturas; então, nesta pesquisa, denominou-se “média-fina” (AM) e “areia fina” (AF) conforme suas características. Foram realizadas análises estatísticas do “Teste t” dos resultados dos respectivos ensaios de caracterização dos dois agregados, identificando-se diferença significativa entre eles.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8843

Figura 1: curva granulométrica das areias



Fonte: os autores.

DOSAGEM E PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

O traço em volume empregado foi o 1:1:6 (cimento: cal: areia), variando entre as areias AF e AM. A definição da relação a/ms foi realizada a partir do ensaio "Flow Table" para um índice de consistência de 260 ± 5 mm, conforme era previsto na versão de 2005 da NBR 13276 [8], e ainda é um valor referência de muitas pesquisas de argamassas de revestimento. Dessa maneira, determinou-se para as duas misturas uma relação a/ms de 0,19, objetivando fixar a quantidade de água uma vez que ambas as argamassas atingiram a faixa de consistência determinada.

As argamassas foram misturadas conforme método prescrito pela NBR 13276 [8]. Estão demonstrados na Tabela 4 os traços em volume, e transformados para traço em massa, de acordo com as massas unitárias de cada material.

Tabela 4: formulações estudadas na pesquisa

Código		Cimento	Cal	Areia Fina	Areia Média-Fina	a/ms	a/c*	Pó xadrez
Traços em volume	**AF**	1,00	1,00	6,00	-	-	-	-
	AM	1,00	1,00	-	6,00	-	-	-
Traços em massa	**AF**	1,00	0,62	8,71		0,19	1,96	0,07
	AM	1,00	0,62		8,42	0,19	1,91	0,07

*a/c = relação água/cimento. Fonte: os autores.

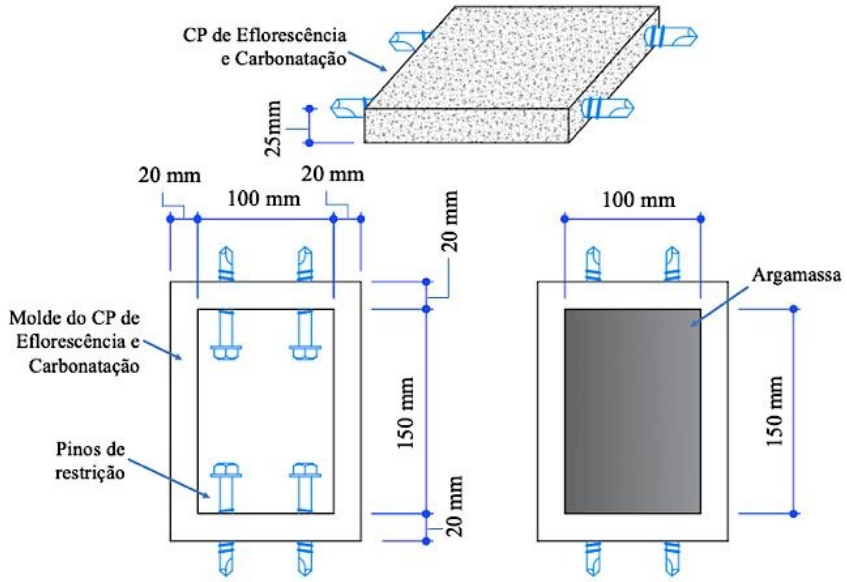
Em razão dos ensaios posteriores de durabilidade, todos os insumos anidros em separado foram submetidos ao ensaio de quantificação elementar de carbono, para o registro da quantidade de carbono inicial e posterior supressão desse valor das análises de durabilidade. A quantificação de carbono foi realizada por meio do equipamento VARIO EL III Analyzer, da marca Elementar, do Laboratório de Biogeoquímica do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR. Segundo Freitas Júnior et al. [4], este equipamento submete as amostras à combustão e a um

processo de redução, fazendo com que todas as moléculas que possuem carbono em sua composição o liberem, possibilitando detectar sua concentração.

Os resultados foram tratados estatisticamente pela análise do “Teste t”, por meio do software GraphPad Prism. Os dados espúrios foram eliminados conforme desvio padrão relativo máximo prescritos nas normas dos respectivos ensaios.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram propostos corpos-de-prova (CPs) nas dimensões de 100x150x25mm, sendo estes em dimensões substancialmente maiores que os utilizados por De Bem [9], vislumbrando simular a geometria de aplicação convencional das argamassas (relação alta entre superfície de exposição e espessura de aplicação). Os CPs foram moldados com restrições no molde para simular a situação em que as argamassas aplicadas estão restritas em razão da aderência ao substrato (Figura 2). A restrição se deu pela inserção de pregos com cabeça de aço zincado (denominados como pinos de restrição), de 3x62,10 mm, na moldagem das argamassas (Figura 2). Ressalta-se ainda que a geometria proposta tende a favorecer a ocorrência das eflorescências e da carbonatação, por possuir maior superfície de contato com o meio.

Figura 2: representação do molde dos CPs para os ensaios de eflorescência



Fonte: os autores.

Para mais, explica-se que para argamassas analisadas nos ensaios de durabilidade foi necessário empregar pó xadrez preto, uma vez que era preciso evidenciar as eflorescências. Utilizou-se esse pigmento inorgânico que, segundo o fabricante, é composto de óxido de ferro e não reage com os aglomerantes. Este mesmo produto foi utilizado por De Bem [9], Aberle et al. [10] e Jang et al. [11], para facilitar a análise do aparecimento de eflorescência.

Os CPs foram moldados em camada única, promovendo o adensamento da argamassa através da execução de movimentos verticais com uma espátula na posição horizontal e com sua lâmina perpendicular ao plano superior do molde, com a aplicação de 10 golpes paralelos e uniformemente distribuídos no comprimento do corpo de prova.

Por fim, rasou-se o molde com a espátula com movimentos de vai-e-vem, com inclinação de aproximadamente 45º em relação à superfície da argamassa. Após moldados, os CPs foram mantidos em ambiente de laboratório (temperatura e umidade médias de 20 ºC e 60%, respectivamente), cobertos com filme plástico para evitar a perda de água da mistura por evaporação.

Após 48 horas foi realizada a desmoldagem e as placas foram submetidas à cura submersa por 7 dias em solução saturada de cal, e após isso submetidas ao ensaio de carbonatação. As placas de argamassa foram colocadas na câmara de carbonatação com concentração do anidrido carbônico (CO_2) de 5% em até 112 dias, com umidade relativa de 70% e temperatura de 25 ºC. Explicita-se ainda que em virtude da metodologia de moldagem, desmoldagem e cura mantida para todos os CPs, optou-se por não submeter os mesmos a uma etapa de pré-condicionamento antes de serem dispostos na Câmara de Carbonatação.

Foram moldados oito CPs por traço de argamassa, dos quais, a cada 28 dias, dois eram retirados da câmara de carbonatação para quantificação mensal de carbono. Os CPs carbonatados tiveram uma porção reduzida a grânulos menores: uma parte foi utilizada no ensaio de porosidade aparente, e a outra parte foi pulverizada e homogeneizada para realização do quantitativo de carbono. Para este ensaio também foi analisada uma amostra homogeneizada de cada CP ensaiado, e os CPs até a execução do ensaio de quantificação foram mantidos em embalagem selada a vácuo.

O ensaio de porosidade aparente realizado foi o proposto por Hoppe Filho et al. [12]. A metodologia desenvolvida pelos autores para obtenção da porosidade aparente consiste em coletar 5 fragmentos de corpos de prova no estado endurecido, deixar imersos em água por 24h, secar a superfície com uma balança analítica determinar a massa dos fragmentos na condição de saturada superfície seca (M_{SSS}), com precisão de 0,0001g. Em sequência, as mesmas amostras devem ser pesadas em balança hidrostática, com precisão de 0,0001g, para determinação da massa submersa (M_{SUB}). Seguindo, os fragmentos devem ficar submersos em álcool etílico p.a. durante 24h, depois retira-se o álcool e eles são secos em estufa à 40 ºC por 24h, para atingir uma constância de massa. Por fim, determina-se a massa seca (M_{SECA}) por meio da mesma balança analítica. Portanto, a porosidade aparente é resultante da relação entre a subtração da massa superfície saturada seca da massa seca (M_{SSS} - M_{SECA}), e a subtração massa superfície saturada seca da massa submersa (M_{SSS} - M_{SUB}).

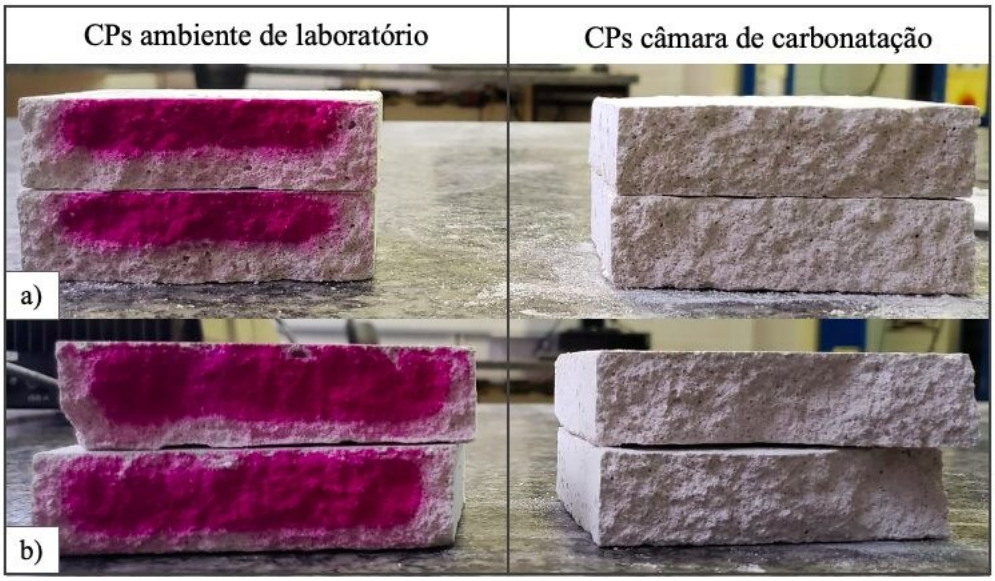
Para fins de validação dos dados experimentais de quantificação de carbono provenientes de ambos os ensaios acelerados (eflorescência e carbonatação), foi realizada a estimativa do potencial de fixação de carbono da argamassa endurecida após os ensaios, conforme metodologia proposta por Freitas Júnior et al. [4].

Para mais, cabe destacar que tanto os resultados da etapa de caracterização dos insumos como os resultados dos ensaios de durabilidade, foram tratados estatisticamente pelo método ANOVA e eliminados os valores espúrios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de carbonatação consistiu em submeter as placas de argamassa à uma câmara de carbonatação em idades de 28 a 112 dias. A cada 28 dias dois CPs por traço foram submetidos: uma parte para o ensaio de porosidade e outra para o ensaio de quantificação de carbono. Explica-se que o método tradicional de análise da frente de carbonatação, por meio da verificação do pH do material, não pôde ser empregado nesta pesquisa, uma vez que se desejava obter dados quantitativos de carbonatação. No entanto, para verificação da evolução da carbonatação das argamassas foram feitos testes preliminares com três CPs em ambiente de laboratório e três CPs por 28 dias na câmara de carbonatação sob as configurações citadas na metodologia. Após os 28 dias os CPs foram quebrados ao meio e sobre as superfícies fraturadas foi aspergido fenolftaleína a 1% dissolvida em 70% de álcool etílico e 30% de água, com o objetivo de verificar se havia tido alteração do pH no material. Portanto, mostra-se na Figura 3 dois exemplos de CPs que passaram por essa análise preliminar.

Figura 3: CPs preliminares do ensaio de carbonatação na idade 28 dias



Legenda: a) CP preliminar argamassa AM; b) CP preliminar argamassa AF. Fonte: os autores.

A partir das imagens, constata-se que com 28 dias as argamassas que estavam na câmara de carbonatação apresentaram carbonatação “total”, pois, de acordo com o parâmetro de avaliação por aspersão de fenolftaleína, esta tendo permanecido incolor aplicada sobre a superfície do CP, denota que o material tem o pH ácido resultante do processo de carbonatação. Os CPs que estavam em ambiente de laboratório já demonstraram que houve uma frente de carbonatação na face que estava exposta ao ar, a outra face estava encostada no fundo da bandeja onde foram acondicionados. Para mais, comenta-se que destes últimos, o CP da argamassa AM apresentou uma frente de carbonatação maior que da AF. Nesse sentido, embora não tenha sido medido, supõe-se que proporcionalmente aos indícios de maior permeabilidade da argamassa AM, os poros permeáveis possam ter contribuído para maior difusão do CO_2 no interior do material. Ademais, buscou-se também verificar nas idades

propostas para o ensaio, se o parâmetro de “carbonatação total” identificado nos CPs preliminares a 28 dias, de fato era o máximo que as argamassas poderiam atingir.

Para tanto, apresentam-se, na Tabela 5, os resultados médios da quantificação de carbono após o ensaio acelerado de carbonatação, nas respectivas idades de finalização.

Tabela 5: formulações estudadas na pesquisa

	Idade (dias)	**Teor de Carbono (Tc) (%)**
Insumos das argamassas	-	0,2
AF	28	3,0
	56	3,0
	84	4,0
	112	4,0
AM	28	4,0
	56	4,0
	84	4,0
	112	4,0

Fonte: os autores.

Na Figura 4, são apresentados os resultados médios do ensaio de porosidade aparente acoplados às médias temporais do teor de carbono (Tc) obtidos ao longo do período de exposição acelerada (0, 28, 56, 84 e 112 dias). A análise estatística por meio do Teste t de Student, realizada para comparar a porosidade inicial (0 dia) com as idades subsequentes (0, 28, 56, 84 e 112 dias), revelou diferenças estatisticamente significativas ($p<0,05$). Esse comportamento confirma a hipótese de colmatação física dos vazios capilares decorrentes da precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), cujo volume molar é superior ao do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) precursor, reduzindo a porosidade aparente das matrizes cimentícias.

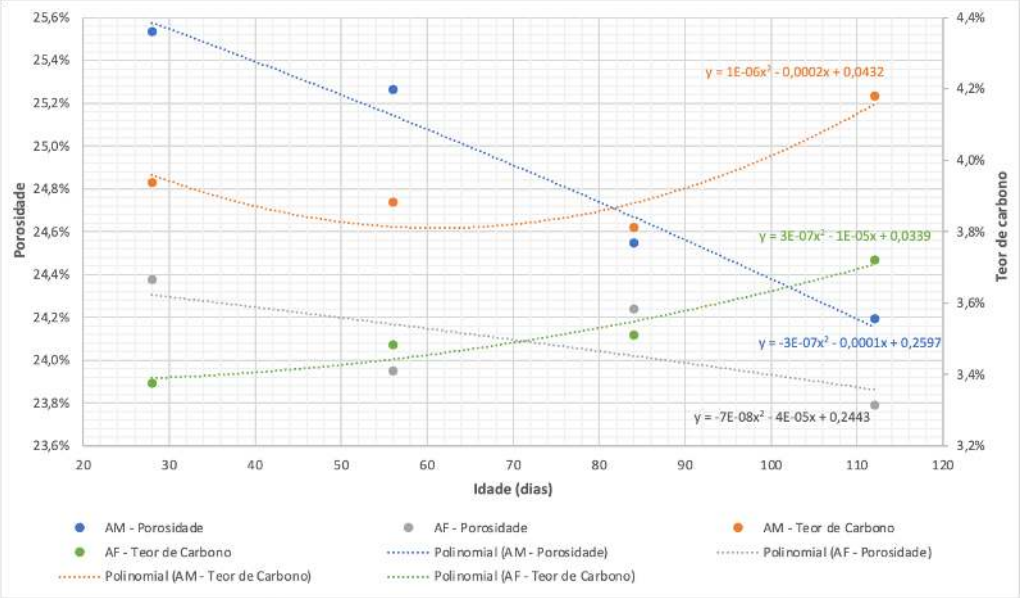
Os ajustes matemáticos das curvas experimentais apresentados na Figura 4 foram modelados por regressões polinomiais de segundo grau, cujas equações descrevem a evolução temporal da porosidade (yp) e do teor de carbono (yc) em função do tempo de exposição (x):

- Para a porosidade aparente:
  - Argamassa AM - $yp = -3x10^{-7}X^2 - 0,0001X + 0,2597$
  - Argamassa AF - $yp = -7\times10^{-8}X^2 - 4\times10^{-5}X + 0,2443$
- Para o teor de carbono (Tc):
  - Argamassa AM - $yc = 10^{-6}X^2 - 0,0002X + 0,0432$
  - Argamassa AF - $yc = 3\times10^{-7}X^2 - 10^{-5}X + 0,0339$

A análise das derivadas de primeira ordem dessas funções (dy/dx) corrobora matematicamente os fenômenos físicos observados. Para as curvas de porosidade, a

taxa de variação negativa (dyp/dx<0) quantifica a desaceleração da colmatação à medida que a matriz se aproxima do estado de saturação por carbonatação. Inversamente, para o teor de carbono, as taxas positivas (dyc/dx>0) modelam a cinética de captura de CO_2, evidenciando a maior velocidade inicial da argamassa AM em relação à AF.

Figura 4: resultados médios de porosidade e carbonatação



Fonte: os autores.

Para avaliar a representatividade físico-química dos teores de carbono (Tc) mensurados, confrontaram-se os dados experimentais com o potencial teórico de absorção estequiométrica de CO_2. Este potencial foi calculado com base no modelo matemático de Lagerblad [5], adaptado para matrizes mistas de cal hidratada por Freitas Júnior et al. [4], que quantifica a capacidade de fixação de carbono a partir dos teores de óxido de cálcio (CaO) e de óxido de magnésio (MgO) reativos presentes nos aglomerantes (Tabela 6). A convergência entre os valores experimentais de Tc e o limite estequiométrico teórico (~4,1% em massa) valida a precisão do modelo.

Tabela 6: Resultados do potencial de absorção de carbono das argamassas

	AF	AM
Potencial de absorção pelo Cimento Portland	1,6%	1,6%
Potencial de absorção pela Cal Hidratada	2,5%	2,6%
Potencial de absorção total	4,1%	4,1%

Fonte: os autores.

Sob o aspecto cinético, a argamassa com areia média (AM) atingiu a saturação reacional aos 28 dias (Tc≈4,0%), enquanto a argamassa com areia fina (AF) demandou 56 dias. Essa disparidade cinética corrobora a influência direta da distribuição granulométrica dos agregados na permeabilidade ao ar da matriz porosa: a menor permeabilidade intrínseca da argamassa AF restringe o fluxo difusivo do CO_2 gasoso. Adicionalmente, o maior empacotamento e o volume de agregados na mistura AF

reduzem proporcionalmente a fração volumétrica da pasta de cimento hidratada e, por conseguinte, a reserva alcalina de hidróxidos passíveis de carbonatação.

A extensão do monitoramento até 112 dias e a determinação direta do Tc por análise elementar por combustão seca mostraram-se fundamentais para mapear o perfil cinético completo e validar a eficiência do arranjo experimental adotado. Em termos comparativos, ensaios de carbonatação natural conduzidos por Freitas Júnior [13] em argamassas mistas de traço 1:1:6 (em volume) sob exposição externa por 730 dias registraram teores de absorção de apenas 2,1% (com variação geral entre 1,3% e 2,8%). Esse contraste evidencia que o método acelerado (5% de CO_2) viabiliza, em tempo hábil, a expressão do potencial termodinâmico máximo de captura do material. Sob a ótica metodológica, os resultados indicam que o período convencional de 28 dias pode ser insuficiente para caracterizar matrizes de baixa permeabilidade (como a AF), tornando indispensável o emprego de técnicas de análise elementar para uma determinação precisa do grau de carbonatação e para evitar conclusões subestimadas sobre o ciclo de vida do material.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados, conclui-se que: Os ensaios de carbonatação acelerada em câmara de 5% de CO_2 mostraram-se eficientes para induzir o potencial máximo de carbonatação em prazos reduzidos (até 56 dias), permitindo a quantificação precisa do sequestro de carbono;

- A distribuição granulométrica da areia influencia diretamente a velocidade da frente de carbonatação. Agregados mais grossos (AM) facilitam a difusão gasosa inicial, atingindo o equilíbrio químico mais rapidamente que agregados finos (AF);
- A carbonatação não apenas fixou carbono na matriz, mas também melhorou as propriedades físicas das argamassas, consolidando a estrutura cimentícia através do preenchimento de poros capilares por cristais de calcita;
- O estudo confirma que as argamassas de revestimento apresentam grande potencial para mitigar o impacto ambiental do cimento, sendo capazes de absorver teores significativos de carbono ao longo de sua vida útil, compensando parte das emissões geradas durante a descarbonatação do calcário na produção do clínquer.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de doutorado, ao PPGECC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil) e ao Laboratório de Tecnologia de Argamassas (LATECA) do DCC (Departamento de Construção Civil) da Universidade Federal do Paraná pela possibilidade de execução dos experimentos. Ao Laboratório de Química da UNICENTRO pelas análises de FRX.

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram o a ferramenta GPT-5.5 para melhoria de coesão textual. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] Fuhaid, A., & Niaz, A. (2022). Carbonation and Corrosion Problems in Reinforced Concrete Structures. **Buildings**. https://doi.org/10.3390/buildings12050586.

[2] Rocha, J., Chileno, N., & Filho, R. (2025). Mechanical and durability performance of mortars with Portland cement, recycled concrete powder, and metakaolin under accelerated carbonation conditions. **Powder Technology**. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120616.

[3] Gu, H., Yang, Z., Tao, Y., Zhang, Y., Huang, W., & Jiang, W. (2025). The influence of SCMs on the pore structure evolution and carbonation of cement pastes under early carbonization. **Construction and Building Materials**. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140194.

[4] Freitas Júnior, J. A.; Costa, M. R. M. M.; Parchen, C. F. A.; Villas Boas, B. T.; Iwakiri, S. The use of wood particles in cementitious materials in order to make them more sustainable as greenhouse gas emissions. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 7, p. 80-87, 2020.

[5] Lagerblad, B. **Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art**, Cement och Betong Institutet - CBI, Stockholm, Sweden, 2005.

[6] Freitas Júnior, J. A.; Costa, M. R. M. M.; Artigas, L. V.; Martins, L.; Sanquetta, C. R. Assessment of the impact of binders in the evolution of carbonation in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 496-501, 2019.

[7] Bauer, L. A. F. **Materiais de Construção: novos materiais para construção civil**. 4ª ed. v1. LTC, 2009.

[8] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.

[9] De Bem, D. H. **Efeito da adição de pozolanas e da cal hidratada na incidência de eflorescência medida através de ensaios acelerados em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

[10] Aberle, T.; Keller, A.; Zurbriggen, R. **Efflorescence. Mechanisms of formation and ways to prevent.** 2o Congresso Nacional de Argamassas para Construção - APFAC, Lisboa, 2007.

[11] Jang, H.; Kang, H.; So, S. Color expression characteristics and physical properties of colored mortar using ground granulated blast furnace slag and White Portland Cement. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1125-1132, 2014.

[12] Hoppe Filho, J.; Rodrigues, C. S.; Ribeiro, L. S. O. P.; Medeiros, M. H. F. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 1-11, 2021.

[13] Freitas Junior, J. A. **Materiais de construção com madeira para mitigação de gases de efeito estufa na execução de edificações**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.