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.v21i1.8970

Argamassas mistas e estabilizadas: captura de CO_2 ao longo do tempo por carbonatação natural

Mixed and stabilized mortars: CO_2 capture over time through natural carbonation

Tayná Bini
UNILA | Foz do Iguaçu-PR | Brasil | taynabini@gmail.com
Isabella Deina de Andrade
UNIOESTE | Cascavel-PR| Brasil | isabella.deina@gmail.com
Edna Possan
UNILA | Foz do Iguaçu-PR | Brasil | edna.possan@unila.edu.br
Giovanna Patrícia Gava
UNIOESTE| Cascavel-PR| Brasil | giovanna.oyamada@unioeste.br

Resumo

A quantificação do CO_2 fixado em argamassas de revestimento ainda carece de estudos experimentais e de procedimentos metodológicos robustos para sua difusão. Neste sentido, este trabalho avaliou a captura de CO_2 em argamassas mistas (cimento e cal) e estabilizadas (hidratação controlada) submetidas à carbonatação natural em ambiente protegido da chuva. Para tal, empregou-se dados experimentais de profundidade de carbonatação, captura estimada de CO_2, com medições por fenolftaleína e análise de imagens, além da comparação complementar por termogravimetria. Os resultados indicaram que as argamassas mistas apresentaram maior avanço da frente de carbonatação e maiores capturas máximas de CO_2, entre 63 e 81 $kgCO_2/m^3$, com compensação entre 41,3% e 44,4%. Nas argamassas estabilizadas, a captura foi menor, variando de 35 a 48 $kgCO_2/m^3$, com compensação entre 21,4% e 37,5%. O estudo contribui ao relacionar profundidade, captura e balanço de CO_2, oferecendo subsídios para a avaliação ambiental de argamassas de revestimento.

Palavras-chave: Argamassas de revestimento. Carbonatação natural. Captura de CO_2. Emissões de CO_2. Compensação ambiental.

Abstract

The quantification of CO_2 fixed in rendering mortars still lacks experimental studies and robust methodological procedures to support its wider dissemination. In this context, this study evaluated CO_2 uptake in mixed mortars, composed of cement and lime, and stabilized mortars, with controlled hydration, subjected to natural carbonation in an environment protected from rain. To this end, experimental data on carbonation depth and estimated CO_2 uptake were used, with phenolphthalein measurements and image analysis, in addition to a complementary comparison by thermogravimetry. The results indicated that the mixed mortars showed greater advancement of the carbonation front and higher maximum CO_2 uptake, ranging from 63 to 81 kg CO_2/m^3, with compensation between 41.3% and 44.4%. In the stabilized mortars, CO_2 uptake was lower, ranging from 35 to 48 kg CO_2/m^3, with compensation between 21.4% and 37.5%. The study contributes by relating carbonation depth, CO_2 uptake, and CO_2 balance, providing support for the environmental assessment of rendering mortars.

Keywords: Rendering mortars. Natural carbonation. CO_2 capture. CO_2 emissions. Environmental compensation.

BINI, T.; ANDRADE, I. D.; POSSAN, E.; GAVA, G. P. Argamassas mistas e estabilizadas: captura de CO_2 ao longo do tempo por carbonatação natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional impulsiona o setor da construção civil, ao atender às necessidades de infraestrutura e moradia da sociedade. Esse setor é responsável por 38% das emissões de CO_2 [1], um dos principais gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o aumento da temperatura média do planeta e o consequente aquecimento global [2]. A produção mundial do cimento Portland (CP), material mais consumido no setor da construção, é responsável por 7% de todo o gás carbônico proveniente de atividades antropogênicas [3], com emissões entre 0,845 e 1,049 toneladas de CO_2/tonelada de clínquer produzido [4]. Em comparação, a produção da cal possui emissões entre 0,607 e 2,169 toneladas de CO_2 por tonelada [5].

No Brasil, 54% da produção de cimento Portland é destinada a revendedores que abastecem o varejo, como lojas de materiais de construção, enquanto 2% é direcionada à produção de argamassas em centrais dosadoras [6]. Essas argamassas são produzidas predominantemente com cimento Portland, cal hidratada e aditivos, materiais com elevadas emissões de CO_2 associadas. Para atender às metas climáticas, faz-se necessária a implementação de estratégias de descarbonização, com destaque para CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage* - captura, utilização e armazenamento de carbono) [7,8].

Nesse contexto, a literatura [09-11] destaca que argamassas de revestimento, sejam mistas de cal e cimento ou estabilizadas, essas últimas também denominadas Argamassas de Hidratação Controlada, podem contribuir para a captura e o armazenamento de carbono. A porosidade das argamassas contribui para a difusão do CO_2, promovendo a fixação de carbono na matriz cimentícia [10]. Porém, na literatura específica, ainda existem poucos estudos voltados ao cômputo do carbono fixado por argamassas devido à carbonatação natural, uma estratégia de CCUS, sem custos adicionais diretos, uma vez que ocorre espontaneamente a partir da exposição dos materiais à base de cimento ao CO_2 atmosférico.

Este trabalho avalia a captura de CO_2 por carbonatação natural em argamassas mistas de cimento e cal, produzidas com três tipos de cimento para comparar diferentes matrizes cimentícias em um traço convencional de revestimento, e em argamassas estabilizadas, com diferentes consumos de cimento e fíler calcário. Nas estabilizadas, manteve-se o cimento CP II-F 40 da dosagem de referência fornecida por uma central dosadora localizada no oeste do Paraná, Sul do Brasil, representando a composição adotada nesse sistema, baseada no uso de fíler calcário e sem emprego de cal.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo (Figura 1) divide-se em: caracterização dos materiais (Tabela 1), moldagem e caracterização das argamassas (Quadro 1), exposição em ambiente externo protegido para a carbonatação natural, medida da profundidade de carbonatação, cálculo das emissões de CO_2 e determinação da captura de CO_2, pelo método BRE [12] e por termogravimetria.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8970

Figura 1: Fluxograma do estudo.

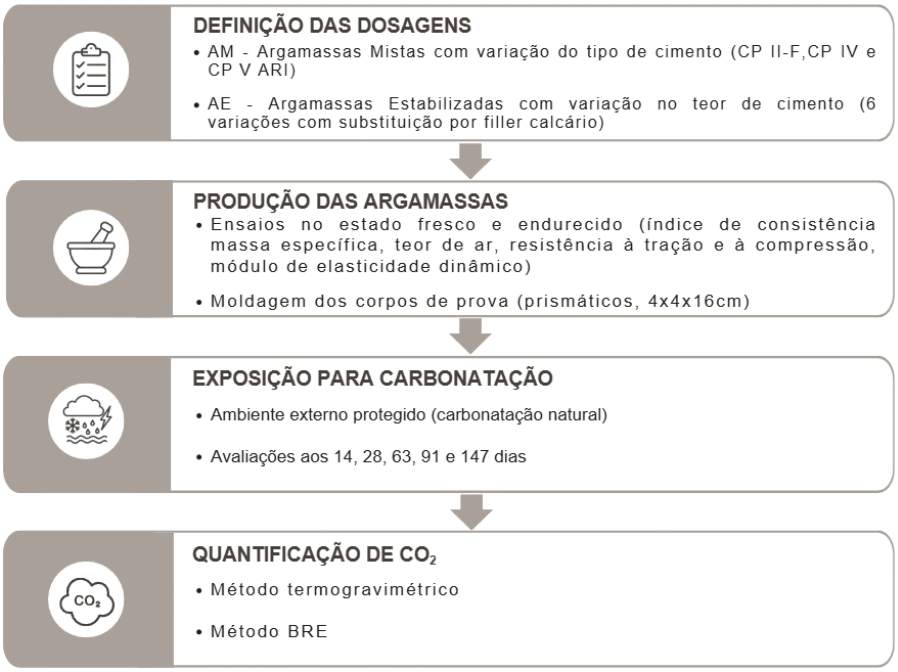


Tabela 1: Caracterização dos materiais

Material	Massa unitária (g/cm³)	Massa específica (g/cm³)
Areia natural*	1,54	2,66
Cimento CP II-F 40	0,92	3,08
Cimento CP IV-32 RS	0,88	2,92
Cimento CP V-ARI RS	0,89	3,00
Cal hidratada	0,74	2,41
Fíler calcário	-	2,74

* Módulo de finura: 1,46; Dimensão máxima: 1,18 mm; Material pulverulento: 0,18%. Fonte: [11,13]

Quadro 1: Denominação e descrição das argamassas.

Denominação das argamassas	Tipo de argamassa	Tipo de cimento	Proporção Consumo de aglomerantes real*
AM-CP II-F	Mista (Cal e Cimento)	CP II F 40	Traço 1:1:6 em volume Consumo de cimento 137 kg/m³ Consumo de cal 113 kg/m³.
AM-CP IV		CP IV 32	
AM-CP V		CP V ARI RS	
AE-130	Estabilizada por 36h (Cimento)**	CP II F 40	Consumo de cimento 135 kg/m³ Consumo de fíler 118 kg/m³
AE-145			Consumo de cimento 150 kg/m³ Consumo de fíler 104 kg/m³
AE-160			Consumo de cimento 166 kg/m³ Consumo de fíler 90 kg/m³
AE-175			Consumo de cimento 184 kg/m³ Consumo de fíler 77 kg/m³
AE-190			Consumo de cimento 195 kg/m³ Consumo de fíler 62 kg/m³
AE-205			Consumo de cimento 215 kg/m³ Consumo de fíler 49 kg/m³

Nota: AM = Argamassas mistas; AE = Argamassas Estabilizadas. *Consumo de aglomerantes variável e diferente da denominação em função do teor de ar incorporado. **Nas AE, os números indicam o consumo nominal de cimento adotado na dosagem. Fonte: Os autores.

As propriedades físicas e mecânicas das argamassas foram retomadas de estudos anteriores [11,13], que caracterizaram separadamente as composições mistas e estabilizadas nos estados fresco e endurecido. A Tabela 2 apresenta as propriedades de todas as composições avaliadas.

Tabela 2: Propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido.

Propriedades	Normativa	AM CP II F	AM CP IV	AM CP V	AE 130	AE 145	AE 160	AE 175	AE 190	AE 205
Índice de consistência (mm)	NBR 13276	278	280	278	247	243	240	267	260	266
Massa específica (g/cm³)	NBR 13278	2,00	1,94	1,94	1,76	1,76	1,77	1,79	1,76	1,82
Teor de ar incorporado (%)	NBR 13278	6,0	8,5	8,7	22,0	22,1	21,8	20,8	22,4	19,8
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279	1,02	0,65	0,78	1,97	2,16	2,53	2,78	2,60	2,80
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279	2,3	1,5	1,6	5,1	5,0	6,3	7,6	6,5	7,5
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	NBR 8522-2	4,4	3,3	3,7	13,2	12,8	14,2	16,1	13,9	15,5

Nota: Resultados no estado endurecido aos 28 dias; Dimensões e procedimentos conforme normativas adotadas. Fonte: Adaptado [11-13].

DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO_2

Corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm) foram submetidos à carbonatação natural em ambiente externo protegido (Figura 2), coberto e livre de precipitação direta.

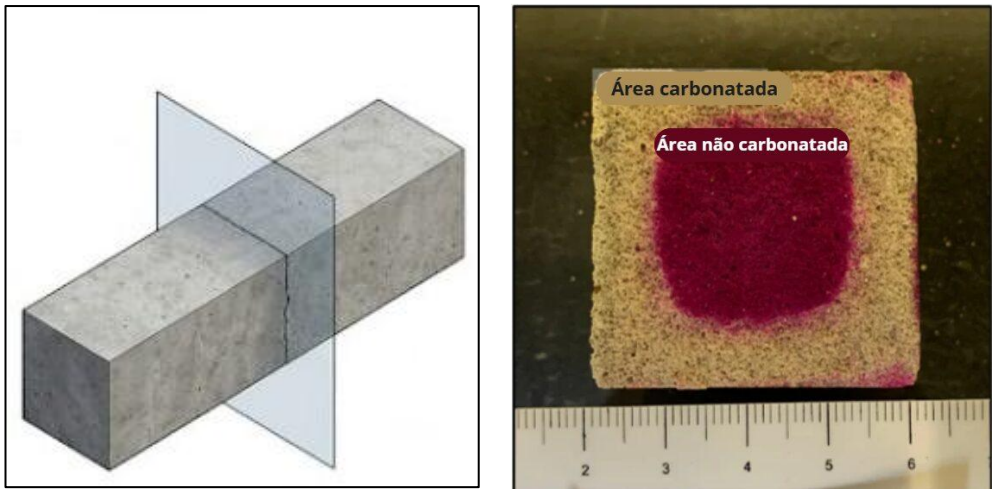
Figura 2: Corpos de prova expostos em ambiente externo protegido.



Fonte: Adaptado [11].

Os corpos de prova foram fraturados em fatias transversais de aproximadamente 40 mm nas idades de controle (14, 28, 42, 63, 91 e 147 dias). Sobre as superfícies recém-fraturadas, fez-se a aspersão de solução de fenolftaleína a 1% (Figura 3). As faces aspergidas foram fotografadas com escala métrica de referência e submetidas ao software *ImageJ* para a medição da área não carbonatada. A área foi convertida para uma profundidade linear média de carbonatação. Face à dimensão das amostras e condições de ensaio, a profundidade máxima de carbonatação obtida no estudo é de 20 mm, considerada como referência.

Figura 3: Medição da profundidade de carbonatação: a) Rompimento do corpo de prova; b) Identificação da área carbonatada.



(a) (b)

Fonte: Os autores.

A emissão de CO_2 de cada argamassa foi determinada pela soma das emissões individuais de seus componentes multiplicada pelo respectivo consumo na dosagem, sendo o cálculo de emissão do cimento dado pela Equação 1.

$$E_{cim} = (E_{clínquer} \times \%Clinquer_{cim}) + (E_{energia} \times FE_{energia}) \quad (1)$$

Para a determinação da captura de CO_2 em cada idade de medição (Equação 2), adota-se o pressuposto geométrico de que a frente de carbonatação avança a partir das quatro faces longitudinais do corpo de prova, atingindo uma profundidade máxima de 20 mm. Em escala de aplicação real, esta dimensão estabelece que 1 m³ de argamassa é capaz de revestir 50 m² de alvenaria.

$$CapCO_2 = ec \times A \times (M1 \times ((CaO_{cim} \times Q_{cim} \times \%C_{cim} \times \%CaO_{cim}) \quad (2)$$

Para as argamassas mistas, a equação considera também as parcelas carbonatáveis de CaO e MgO provenientes da cal. As variáveis matemáticas e parâmetros empregados para a resolução de ambas as equações estão descritos nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Variáveis para cálculo das emissões de CO_2 dos materiais.

Variável	Valor	Referência
$E_{clínquer}$	832 $kgCO_2/t$	[14]
%Clínquer CP II-F 40	77,0%	NBR 16697 [15]
%Clínquer CP IV-32 RS	57,5%	NBR 16697 [15]
%Clínquer CP V-ARI RS	79,0%	NBR 16697 [15]
$FE_{energia}$	0,08 $kgCO_2/kWh$	[16]
$E_{energia}$	108 kWh/t	[14]
E_{cal}	616 $kgCO_2/t$	[5]
E_{areia}	12,50 $kgCO_2/t$	[17]
E_{filler}	8,0 $kgCO_2/t$	[18]
$E_{aditivo}$	245,83 $kgCO_2/t$	[19]

Fonte: Os autores.

Tabela 4: Variáveis para cálculo da captura de CO_2 das argamassas.

Variável	Valor	Referência
CaO_{cim} CP II-F 40	58,75%	Ensaio, NBR 14656 [15]
CaO_{cim} CP IV-32 RS	49,53%	Ensaio, NBR 14656 [15]
CaO_{cim} CP V-ARI RS	50,56%	Ensaio, NBR 14656 [15]
CaO_{cal}	36,11%	Ensaio, NBR 14656 [15]
MgO_{cal}	26,96%	Ensaio, NBR 14656 [15]
$\%CaO_{cim}$	80%	[20]
$\%CaO_{cal}$	60%	[21]
$\%MgO_{cal}$	60%	Analogia à %CaOcal
A	50 m^2/m^3	Calculado
M1	0,78 $kgCO_2/kg$ CaO	Fração molar
M2	1,1 $kgCO_2/kg$ MgO	Fração molar

Fonte: Os autores.

As equações utilizadas foram adotadas por já terem sido empregadas na literatura [9,22], com base na metodologia BRE [12]. A quantificação do CO_2 das matrizes cimentícias foi determinada por análise termogravimétrica (TG/DTG): as amostras em pó (malha 0,15 mm) das regiões carbonatadas e não carbonatadas foram extraídas das zonas de fratura, isolando-se o material do contato com o indicador de pH para evitar contaminação [09]. A análise foi realizada em analisador térmico simultâneo STA8000 PerkinElmer™, com cadinho de alumina, massa de amostra de 50 ± 1 mg, fluxo de nitrogênio de 20 mL/min e taxa de aquecimento de 20 °C/min. O ensaio foi conduzido de 35 °C a 1000 °C, com permanência inicial a 35 °C por 1 h para remoção da água livre.

BALANÇO DE CO_2

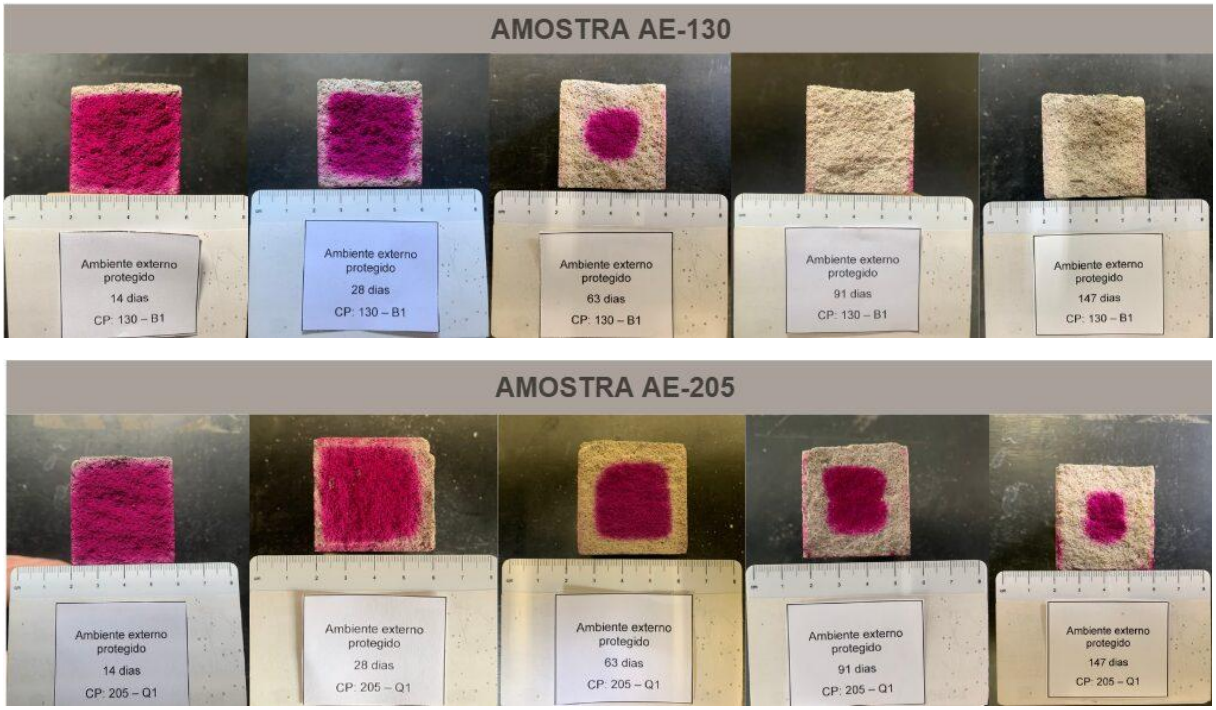
O balanço ambiental de dióxido de carbono é determinado pelo saldo líquido entre as emissões para produção da argamassa e a quantidade de CO_2 sequestrada pela argamassa ao longo de seu período de exposição.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 ilustra o avanço da carbonatação ao longo do tempo nas argamassas AE-130 e AE-205, que apresentaram, respectivamente, a maior e a menor captura efetiva de CO_2 entre as estabilizadas. As demais séries apresentaram comportamento semelhante, com valores intermediários de captura.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8970

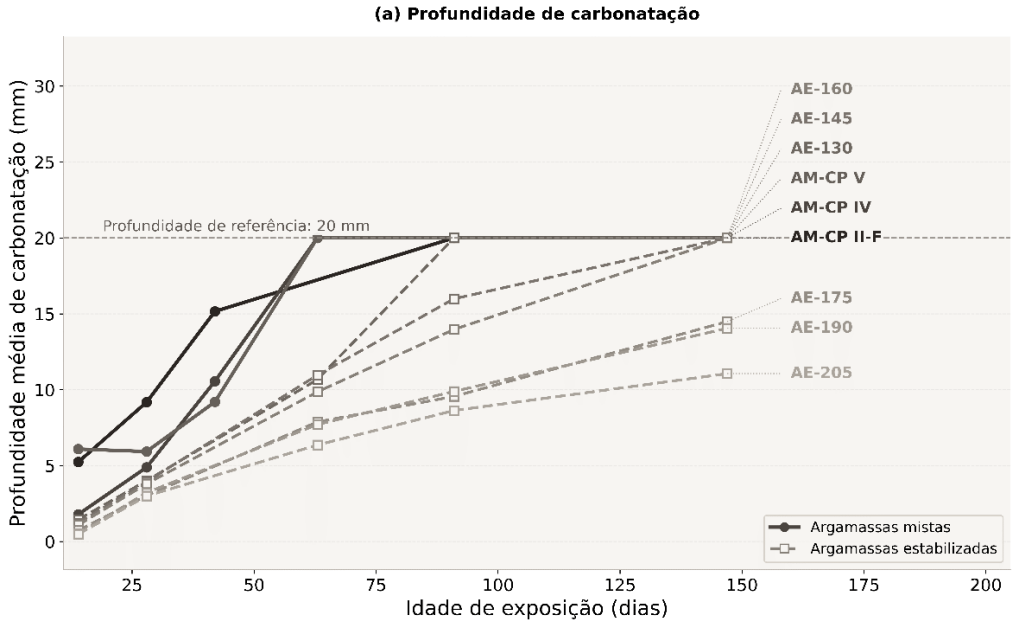
Figura 4: Carbonatação de amostras das argamassas AE-130 e AE-205 ao longo do tempo.

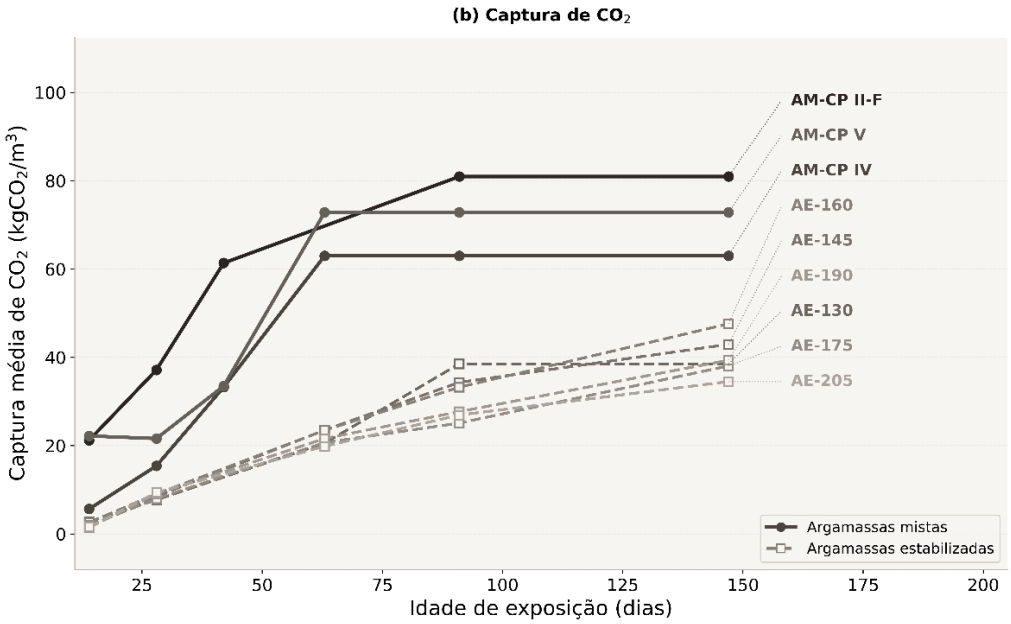


Fonte: Os autores.

A Figura 5 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação e da captura de CO_2 determinada pela equação (2) ao longo do tempo para as argamassas mistas e estabilizadas expostas ao ambiente externo protegido.

Figura 5: Profundidade de carbonatação e captura de CO_2 ao longo do tempo no ambiente externo protegido: (a) profundidade de carbonatação; (b) captura de CO_2, determinada pela equação (2).





Nota: Devido a danos na amostra AM-CP II-F aos 63 dias, esse dado foi desconsiderado. Fonte: Os autores.

Observa-se, na Figura 5a, que as argamassas mistas apresentaram maior avanço da profundidade de carbonatação ao longo do período avaliado, aproximando-se ou atingindo a profundidade máxima de 20 mm em idades inferiores às observadas para a maior parte das argamassas estabilizadas. Esse comportamento se reflete diretamente nos valores de captura apresentados na Figura 5b, uma vez que a captura estimada está associada ao avanço da frente carbonatada na espessura analisada. O resultado é coerente com a literatura, que associa a carbonatação de argamassas à porosidade e à pequena espessura dos revestimentos [9, 22].

As argamassas mistas também apresentaram maiores valores de captura de CO_2, o que pode ser relacionado à presença de cal na composição, ampliando a disponibilidade de compostos carbonatáveis, especialmente CaO e MgO, conforme os dados de caracterização. Essa interpretação é compatível com a ideia de que a carbonatação envolve a difusão do CO_2 para o interior da matriz cimentícia e sua reação com fases alcalinas, formando carbonatos estáveis [22-23].

Entre as estabilizadas, a evolução foi mais gradual e os valores finais permaneceram mais próximos entre si, indicando que o aumento do consumo de cimento não resultou, necessariamente, em maior captura no período analisado. Esse comportamento pode estar associado à estrutura porosa das misturas e ao ritmo de avanço da carbonatação no ambiente externo protegido. Assim, a captura efetiva não depende apenas da quantidade de compostos carbonatáveis, mas também das condições de transporte de CO_2 na matriz, associadas à porosidade, umidade e ambiente de exposição [23-24].

A Tabela 5 apresenta a profundidade máxima de carbonatação, a captura máxima estimada (Equação 2) e a primeira idade em que essa captura foi atingida para cada argamassa no ambiente externo protegido.

Tabela 5: Profundidade máxima de carbonatação e captura máxima estimada no ambiente externo protegido

Argamassa	Carbonatação (mm)		Captura de ($kgCO_2/m^3$)	
	Profundidade (mm)	Idade (dias)	Máxima*	Efetiva**
AM-CP II-F	20,00	91	81	81
AM-CP IV	20,00	63	63	63
AM-CP V	20,00	63	73	73
AE-130	20,00	91	39	39
AE-145	20,00	147	43	43
AE-160	20,00	147	48	48
AE-175	14,50	147	53	39
AE-190	14,05	147	56	39
AE-205	11,06	147	62	35

* Associada à carbonatação total do material. **Associada à profundidade de carbonatação da amostra até a data de medição. Fonte: Os autores.

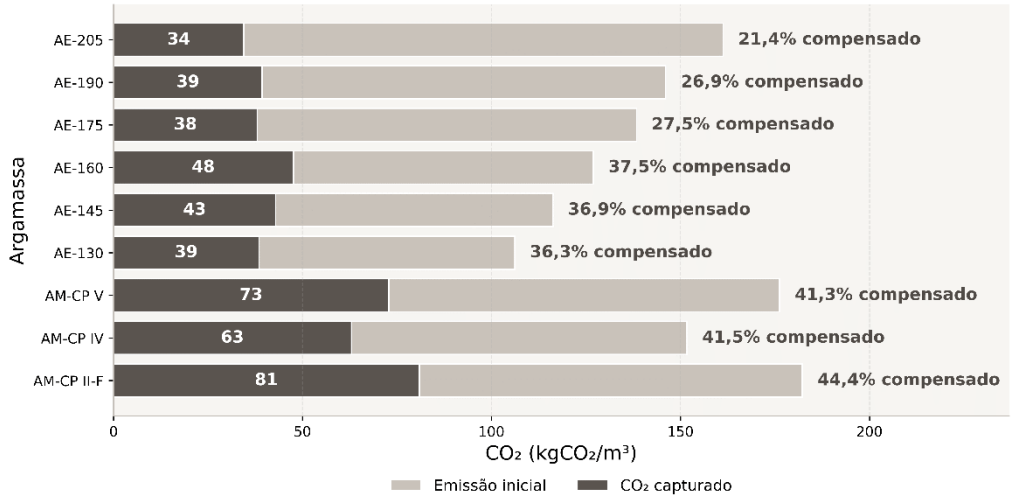
Observa-se que todas as argamassas mistas atingiram a profundidade máxima de 20 mm, com capturas variando de 63 a 81 $kgCO_2/m^3$. A AM-CP II-F apresentou a maior captura máxima, com 81 $kgCO_2/m^3$ aos 91 dias, enquanto AM-CP IV e AM-CP V atingiram seus maiores valores aos 63 dias. Esse comportamento indica que as argamassas mistas atingiram maiores profundidades de carbonatação em idades menores, o que pode estar associado à presença de cal que disponibiliza mais compostos carbonatáveis e uma maior porosidade das argamassas. A contribuição da cal na captura de CO_2 pode ser verificada comparando as argamassas AM-CP II-F e AE-130, ambas foram confeccionadas com o mesmo cimento, têm consumos de cimento próximos (137 e 135 kg/m^3, respectivamente) e atingiram a máxima profundidade de carbonatação aos 91 dias. Contudo, a argamassa mista capturou 81 $kgCO_2/m^3$ enquanto a argamassa estabilizada capturou 39 $kgCO_2/m^3$. Observa-se na Tabela 2 que a argamassa AM-CP II-F apresentou resistências inferiores à argamassa AE-130, apesar do menor teor de ar incorporado no estado fresco; indicando que a argamassa mista com cal tende a possuir uma maior rede de poros no estado endurecido devido às características dos produtos de carbonatação da cal o que contribui para o maior ingresso de CO_2 e consequente maior captura.

Entre as argamassas estabilizadas, AE-130, AE-145 e AE-160 também atingiram 20 mm de profundidade carbonatada, porém com menores valores de captura efetiva, entre 39 e 48 $kgCO_2/m^3$. Já AE-175, AE-190 e AE-205 não alcançaram a profundidade máxima de referência, de 20 mm, no período analisado, apresentando profundidades de 14,50 mm, 14,05 mm e 11,06 mm, respectivamente. Por isso, embora apresentem potencial para alcançar capturas máximas estimadas de 53, 56 e 62 $kgCO_2/m^3$, respectivamente, as capturas efetivas foram menores, de 39, 39 e 35 $kgCO_2/m^3$. Esses resultados indicam que a carbonatação dessas argamassas ainda estava em desenvolvimento aos 147 dias, podendo haver incremento da captura em idades posteriores.

BALANÇO DE CO_2 E COMPENSAÇÃO DAS EMISSÕES

A Figura 6 apresenta a relação entre a emissão inicial de CO_2 das argamassas e a captura efetiva estimada no ambiente externo protegido.

Figura 6: Emissão inicial, captura efetiva e compensação das emissões no ambiente externo protegido.



Nota: Percentuais referentes à compensação. Fonte: Os autores.

Observa-se que as argamassas mistas apresentaram os maiores valores absolutos de captura e os maiores percentuais de compensação de carbono, variando de 41,3% a 44,4%. Entre elas, a AM-CP II-F apresentou a maior compensação, com 44,4%, seguida por AM-CP IV e AM-CP V, que apresentaram valores muito próximos. Esse resultado indica que, no ambiente externo protegido, a maior captura das argamassas mistas teve reflexo direto na redução relativa das emissões iniciais.

Nas argamassas estabilizadas, os percentuais de compensação foram menores e variaram de 21,4% a 37,5%. A AE-160 apresentou o melhor desempenho relativo entre as estabilizadas, enquanto a AE-205 apresentou a menor compensação. Esse resultado reforça que a avaliação ambiental das argamassas deve considerar não apenas a captura absoluta de CO_2, mas também sua relação com a emissão inicial de cada formulação.

ANÁLISE COMPLEMENTAR DOS POTENCIAIS DE CAPTURA POR TERMOGRAVIMETRIA

A Tabelas 6 apresenta a comparação entre a captura máxima calculada a partir da profundidade de carbonatação e o potencial de captura obtido por termogravimetria (TG) para as argamassas analisadas. As amostras destinadas à TG foram coletadas aos 28 dias de exposição, idade em que já era possível distinguir visualmente as regiões carbonatadas e não carbonatadas nas seções fraturadas.

Tabela 6: Comparação entre captura calculada por profundidade e potencial por TG

Argamassa	Captura máxima determinada via equação 2 ($kgCO_2/m^3$)	Análise termogravimétrica				Relação TG/equação 2 (%)
		$CaCO_3$ capturado (%)	$MgCO_3$ capturado (%)	CO_2 total (%)	Potencial de captura ($kgCO_2/m^3$)	
AM-CP II-F	81	0,34	0,4	0,36	20,9*	26
AM-CP IV	63	3,36	0,31	1,64	62,2	99
AM-CP V	73	3,95	0,3	1,89	50,7	70
AE-130	39	3,97	-	1,75	30,54	78
AE-145	43	2,18	-	0,96	17,15	40
AE-160	48	5,77	-	2,54	45,67	95
AE-175	53	7,98	-	3,51	62,97	118
AE-190	56	6,09	-	2,68	47,17	84
AE-205	62	6,16	-	2,71	49,38	79

* Devido à profundidade relativamente pequena da região carbonatada na data da coleta (8 mm), supõe-se que a amostra analisada estava semicarbonatada. Fonte: Os autores.

Observa-se que a AM-CP IV apresentou maior proximidade entre os dois métodos, com potencial por TG correspondente a 99% da captura máxima calculada. Para a AM-CP V, a relação foi de 70%, enquanto a AM-CP II-F apresentou maior diferença, com 26%. No caso da AM-CP II-F, essa diferença pode estar relacionada à menor profundidade de carbonatação na região de coleta da amostra para TG, indicando possível condição semicarbonatada.

Nas argamassas estabilizadas, a relação TG/equação 2 variou de 40% a 118%, com maior proximidade para AE-130, AE-160, AE-190 e AE-205. A AE-145 apresentou o menor percentual, indicando possível heterogeneidade da amostra analisada ou limitação pontual da região coletada para TG, enquanto a AE-175 apresentou valor superior ao estimado pela equação, sugerindo maior concentração local de carbonatos na amostra analisada.

Esses resultados evidenciam a importância de relacionar a medida de profundidade de carbonatação com a análise termogravimétrica, pois os métodos avaliam aspectos complementares do processo: a profundidade permite acompanhar o avanço da frente carbonatada ao longo do tempo, enquanto a TG quantifica os carbonatos efetivamente formados na amostra analisada. Dessa forma, a associação entre os dois procedimentos contribui para compreender melhor a evolução da captura de CO_2 por carbonatação natural.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da avaliação da captura de CO_2 ao longo do tempo para argamassas mistas e estabilizadas expostas ao ambiente externo protegido, conclui-se que:

a) As argamassas mistas e estabilizadas apresentaram aumento progressivo da profundidade de carbonatação e da captura de CO_2 ao longo do tempo, indicando o avanço da carbonatação natural na espessura analisada.

b) As argamassas mistas atingiram a profundidade de referência de 20 mm em menor tempo e apresentaram maiores capturas máximas, variando de 63 a 81 $kgCO_2/m^3$. Esse

comportamento pode estar associado à presença de cal, que amplia a disponibilidade de compostos carbonatáveis, especialmente CaO e MgO e a uma maior porosidade dos produtos de carbonatação da cal.

c) Entre as argamassas estabilizadas, as AE-130, AE-145 e AE-160 atingiram 20 mm de profundidade carbonatada, porém com menores valores de captura. Já as AE-175, AE-190 e AE-205 não alcançaram a profundidade máxima (20 mm) no período avaliado.

d) O maior consumo de cimento nas argamassas estabilizadas não resultou, necessariamente, em maior captura de CO_2, indicando que o desempenho pode depender também do avanço da frente de carbonatação e da estrutura porosa da matriz.

e) A análise do balanço de CO_2 mostrou que as argamassas mistas apresentaram maiores percentuais de compensação das emissões, entre 41,3% e 44,4%, enquanto as estabilizadas variaram de 21,4% a 37,5%.

f) A comparação com os dados de termogravimetria das argamassas mistas e estabilizadas mostrou que a TG é complementar ao cálculo pela profundidade de carbonatação, pois permite quantificar os carbonatos efetivamente formados na amostra, enquanto a estimativa por profundidade avalia a extensão da frente carbonatada no revestimento.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA).

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro e segundo autor utilizaram ferramentas de inteligência artificial generativa e de apoio à edição, especificamente o ChatGPT, da OpenAI, para tradução do resumo, revisão ortográfica e aprimoramento de códigos em Python empregados na geração de gráficos; o Gemini, da Google, para auxílio na geração de imagens (Figura 3-A); e o Canva Pro, da Canva, para edição de imagens inseridas no texto. Após o uso dessas ferramentas, todo o conteúdo foi revisado, editado e validado pelos autores, que assumem integral responsabilidade pela versão final do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] United Nations Environment Programme. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction:** Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, 2020. https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf.

[2] IPCC. **Climate Change 2021:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S. l.]: Cambridge University Press, 2021.

[3] SNIC. Sindicato Nacional da Industria do Cimento. **ROADMAP tecnológico do cimento:** potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. mar.2019. https://snic.org.br/assets/pdf/roadmap/roadmap-tecnologico-do-cimento-brasil.pdf

[4] SIDAC. Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. **Dados Do Produto - Clínquer**. 2024. https://sidac.org.br/produtos/45.

[5] JOHN, V.M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal.** Economia de Baixo Carbono - Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira. Ribeirão Preto: Funpec Editora. 2014.

[6] SNIC. Sindicato Nacional da Industria do Cimento. (2024). **Relatório Anual 2024.** https://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1763075552.pdf.

[7] IEA. International Energy Agency. (2018). **Technology roadmap:** Low-carbon transition in the cement industry. https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-thecement-industry

[8] WBCSD. World Business Council For Sustainable Development, International Energy Agency. **Low Carbon Technology Roadmap for the Indian Cement Sector:** Status Review 2018, 52. https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/LowCarbon-Technology-Roadmap-for-the-Indian-Cement-Sector-Status-Review-2018.

[9] FONTOLAN, B. L. et al. CO_2 emissions and uptake in rendering mortars: sustainable approach. **AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE),** v. 24, p. e131131-20, 2024.

[10] OLIVEIRA, D. R. B*. et al*. Avaliação da captura de carbono em argamassas de revestimento durante a fase construtiva: um estudo de caso. ***Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis***, 1–12. 2024.

[11] GOMES, J. L. **Sequestro de CO_2 devido à carbonatação de argamassas com diferentes tipos de cimento por meio de análise termogravimétrica**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2024.

[12] BRE GLOBAL LTD. **BRE Environmental Product Declaration:** Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to EN 15804:2012. Watford: BRE Global Ltd., 2014.

[13] ANDRADE, I. D. *et al.* Caracterização de argamassas estabilizadas com diferentes teores de cimento e fíler. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 66., 2025, Curitiba. **Anais [...]** São Paulo: IBRACON, 2025.

[14] GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **GNR 2.0:** GCCA in Numbers. 2019.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR**. Rio de Janeiro.

[16] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **4ª Comunicação Nacional do Brasil a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília, 2021.

[17] SCHMALFUSS, L. M., TIMM, J., PASSUELLO, A. C. B. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção:** minerais. São Paulo: SIDAC, 2022.

[18] MILLER, S. A. *et al.* Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research,** v. 114, p. 115–124, 2018.

[19] ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION (EPD). **The International EPD System**: Plasticizing admixture for concrete. Estocolmo, 2021.

[20] XI, F. *et al.* **Substantial global carbon uptake by cement carbonation.** Nature Geoscience. 2016.

[21] STANMORE, B. R.; GILOT, P. **Review-calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for CO_2 sequestration**. 2005. Fuel Processing Technology.

[22] MAZURANA, L. **Captura de CO_2 em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

[23] GREVE-DIERFELD, S. *et al.* Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, v. 53, 2020.

[24] PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, *[S. l.]*, v. 7, n. 4, p. 7–20, 2008.