XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Captura de CO_2 em argamassas de revestimento: avaliação de cenários

CO_2 capture of rendering mortars: Scenarios analysis

Beatrice Lorenz Fontolan
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | fontolanbeatrice@gmail.com
Giovanna Patrícia Gava
Universidade Estadual do Oeste do Paraná | Cascavel | Brasil | gpgava@gmail.com
Edna Possan
Universidade Federal da Integração Latino Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | epossan@gmail.com

Resumo

Avalia-se a captura de CO_2 devido à carbonatação natural em argamassas de revestimento com distintos teores de cal hidratada, considerando espessuras de aplicação de 10 a 80 mm. Dados de profundidade de carbonatação ao longo do tempo de amostras em ambiente externo protegido foram usados na modelagem. A avaliação do teor de carbono fixado foi conduzida via termogravimetria. Tem-se que quanto maior o teor de cal, menor a velocidade de difusão e maior o teor de CO_2 fixado. Espessuras de revestimento maiores que 20 mm demandam tempos superiores a 3 meses para o esgotamento da capacidade de fixação de carbono.

Palavras-chave: Materiais Cimentícios. Sequestro de CO_2. Sustentabilidade. Medidas compensatórias.

Abstract

The CO_2 capture due to natural carbonation in rendering mortars with different hydrated lime contents is evaluated, considering application thicknesses from 10 to 80 mm. Data about carbonation depth over time from samples in a protected outside environment were used in the modeling. The evaluation of the fixed carbon content was by thermogravimetry. The higher the lime content, the lower the diffusion speed and the higher the fixed CO_2 content. Coating thicknesses greater than 20 mm require more than 3 months to finish the carbon fixation capacity.

Keywords: Cement materials. CO_2 sequestration. Sustainability. Compensatory measures. Scenarios.

Como citar:
FONTOLAN, B. L.; GAVA, G. P.; POSSAN, E. Captura de CO_2 em argamassas de revestimento: avaliação de cenários. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-12.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um dos grandes contribuintes para a emissão antropogênica de CO_2, sendo a produção do cimento responsável globalmente por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido (WBCSD, 2019). O CO_2, um dos principais Gases do Efeito Estufa (GEE), é responsável pelo aumento da temperatura média do planeta e consequente aquecimento global (IPCC, 2021). No Brasil, a emissão do Cimento é da ordem de 564 Kg por tonelada de produto (WBCSD, 2019) e, da cal, de 607 a 2169 Kg por tonelada, devido as diferentes tecnologias e materiais de combustão empregados e da descarbonatação da matéria-prima. A elevada emissão da cal deve-se à falta de eficiência e de controle dos fornos utilizados no processo de fabricação, que varia de acordo com o tipo e quantidade de energia consumida (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014).

Visando reduzir os impactos associados às emissões de CO_2, vários processos de sequestro e estocagem de carbono vêm sendo estudados. Um deles é o método químico da carbonatação, que em materiais à base de cimento corresponde a reação do CO_2 da atmosfera com compostos alcalinos presentes no material cimentício, dentre eles o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) resultando na formação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e água (H_2O) (KALIYAVARADHAN; LING, 2017; PHAM, 2013; WIJAYASUNDARA; MENDIS; NGO, 2017; YANG; SEO; TAE, 2014). Esta reação também ocorre em materiais a base de cal, onde pode-se ter a presença dos hidróxidos de cálcio e de magnésio, a depender da origem mineralógica da rocha empregada na produção da cal (ERGENÇ; FORT, 2018; KANG; KWON; MOON, 2019).

A cal é comumente empregada em argamassas por apresentar propriedades satisfatórias, como, menor retração por secagem e maior retenção de água, melhora a trabalhabilidade e a plasticidade (CHEVER; PAVÍA; HOWARD, 2010).

Argamassas são comumente produzidas com cimento e cal hidratada, aplicadas em pequenas espessuras, o que é propício para a fixação de CO_2 no processo de carbonatação natural. O CO_2 pode reagir quimicamente com ($Ca(OH)_2$) o $Mg(OH)_2$, formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e de magnésio ($MgCO_3$), respectivamente, (DELABONA; GAVA; RUFATTO, 2020; FONTOLAN; GAVA; SILVA, 2020; MAZURANA *et al.*, 2021). Contudo, de acordo com Fukui et al. (2013), a quantidade de CO_2 liberada para a fabricação da argamassa é diretamente proporcional à porcentagem de cimento e cal hidratada de sua composição, devendo-se ponderar o uso destes materiais.

As argamassas de revestimento de cimento e cal hidratada são bastante porosas, permitindo a rápida difusão do CO_2 atmosférico para o interior da matriz, com fixação de carbono devido à mineralização. No Brasil, aproximadamente 50% do cimento produzido é destinado à produção de argamassas, onde 4% são industrializadas e 96% feitas em obra (CETESB; BID, 2018). Segundo o SNIC (2020), o setor da construção brasileira terminou 2020 com 61,05 milhões de toneladas de cimento produzidas. Ou seja, 28,08 milhões de toneladas de cimento destinados para a produção de argamassas. Deste modo, com base em um traço de argamassa comumente usados (1:1:6), a demanda é de 28,08 milhões de tonelada de cal 167 milhões de toneladas de areia.

O objeto dessa pesquisa é avaliar a captura de CO_2 devido à carbonatação natural em argamassas de revestimento produzidas com distintos teores de cal hidratada, analisando diferentes cenários em função do tempo, considerando relações de m^2/m^3 de argamassas de revestimento, ou seja, diferentes espessuras.
Este estudo converge com o objetivo do Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). A intenção do acordo é limitar o aquecimento Global em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, por meio da redução dos GEE, especialmente das emissões de dióxido de carbono antropogênicas. Ainda estão no escopo da pesquisa os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) "12 - Consumo e produção responsáveis" e "13 - Ação contra mudança global do clima" (UN, 2015).

MÉTODO

ESTUDO EXPERIMENTAL

Para avaliação do potencial de captura de CO_2 em argamassas de revestimento, foram moldados corpos de prova prismáticos de dimensões médias de 40 x 40 x 160 mm conforme o proporcionamento indicado na Tabela 1. A nomenclatura de cada argamassa representa o traço de cada composição (cimento:cal:areia, em volume). Empregou-se o cimento Portland composto com pozolana (CP II–Z–32), cal hidratada magnesiana (CH-III) e areia natural de origem quartoza.

Tabela 1: Consumo de materiais em kg/m^3 e emissões de CO_2 para a produção de 1 m^3 de argamassa de revestimento

Argamassa	Teor de cal	Cimento	Cal	Areia natural	Água	Emissão de CO_2 (kg/m^3)*
1:0,5:6	0,5	174,8	61,4	1543,6	335,6	211,68
1:1:6	1	168	117,6	1483,3	324,31	254,49
1:2:6	2	156,7	219,4	1383,6	341,3	332,78

*Valores calculados por Fontolan et al. (no prelo), considerando as emissões associadas aos materiais constituintes da mistura (do berço ao portão), não considerando as e emissões de transporte de produção da argamassa.
Fonte: os autores.

CARBONATAÇÃO NATURAL DAS ARGAMASSAS

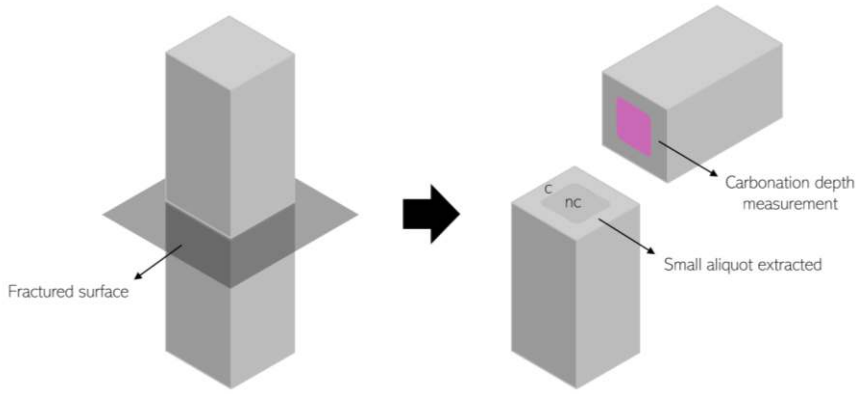
Corpos de prova de argamassas de revestimento foram expostos a ação natural de CO_2 durante 119 dias em ambiente de exposição externo protegido das intempéries. Em cada idade de ensaio os corpos de prova foram fraturados no sentido longitudinal para obtenção de uma fatia para medição da profundidade de carbonatação ao logo do tempo. O topo dos corpos de prova não foi vedado tendo em vista que a velocidade de difusão de CO_2 não era suficiente para vencer a dimensão da fração da amostra nos tempos de ensaios determinados no projeto experimental. A medição da profundidade de carbonatação foi conduzida nas idades de 14, 28, 42, 63, 91 e 119 dias, sendo determinada por meio de análise de imagem pelo *software ImageJ* pelo

método de aproximação de áreas, para se obter maior precisão devido a menor interferência do operador.

DETERMINAÇÃO DA CAPTURA DE CO_2 PELA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A coleta de material para análise termogravimétrica (TGA – *Thermogravimetry Analysis*) foi realizada em corpos de prova fraturados na idade de 28 dias. Fez-se aspersão de indicador químico fenolftaleína em uma das faces do corpo de prova, conforme (Figura 1). Então fez-se a coleta de material na "face espelho" (sem aspersão de indicador químico) da região carbonatada (C) e não carbonatada (NC). As alíquotas coletadas foram cominuídas em almofariz de ágata e passadas na peneira de malha 0,15mm, sendo então armazenadas em suportes de amostra hermeticamente fechados e identificados, mantidos no laboratório até a realização da análise. Esse processo foi realizado com rapidez a fim de evitar a carbonatação atmosférica do material.

Figura 1: Representação do processo de coleta de amostra.



Fonte: os autores.

A análise termogravimétrica foi realizada em analisador térmico simultâneo STA8000 PerkinElmerTM com faixa de leitura variando entre 15 e 1600 ºC. Utilizou-se como parâmetros de ensaio: o uso de cadinho de alumina; a consideração de 50±1 mg de massa, para cada amostra, fluxo de nitrogênio de 20 $mL.min^{-1}$, taxa de aquecimento do equipamento de 20°C.min^{-1} e intervalo de aquecimento entre 35°C e 900°C. Para a retirada da umidade, as amostras foram pré-aquecidas dentro do equipamento a 35 °C, na primeira hora de ensaio. Para a determinação da captura de CO_2 foram analisadas a TG e a DTG das amostras com o auxílio do software OriginPro®. Analisou-se os pontos de volatilização dos compostos dos materiais e do material cimentício não carbonatados e carbonatados, nos quais encontraram-se as massas correspondentes às temperaturas inicial e final de cada pico característico. Esses valores foram inseridos em um software de tabulação, que calculou as diferenças de perda de massa entre as amostras, a partir do método das tangentes descrito por Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016).

AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS

Conforme proposto por Kaliyavaradhan e Ling (2017) e Possan (2019), pode-se determinar a captura potencial e a efetiva de CO_2 devido à mineralização de materiais a base de cimento. O potencial geralmente não leva em considerações a variável aplicação do material, sendo expresso em kg.CO_2/m³. Já a captura efetiva ou real, considera o material em uso durante o ciclo de vida, ponderando a espessura de aplicação, ambiente de exposição, proteção superficial entre outros fatores que afetam a difusão de CO_2 no material a base de cimento (POSSAN, 2019). Assim, foi possível mensurar a captura de CO_2 em diferentes cenários, de acordo com o avanço de CO_2 ao longo do tempo, que é dado pela medição da profundidade de carbonatação atingida em diferentes idades. Com a captura efetiva, é possível analisar o comportamento do revestimento argamassado ao longo do tempo, por meio da análise de diferentes cenários de exposição, prevendo a captura de CO_2. Desta maneira, foram utilizadas as espessuras de carbonatação medidas nos corpos de prova de argamassa aos 14, 28, 42, 63, 91 e 119 dias com base nos procedimentos descritos pela RILEM CPC18 (1988). Para idades avançadas, foi feita uma extrapolação, por meio do modelo de Tuutti (1982), Equação 1, simulando a espessura carbonatada que ultrapassaria a espessura limite do corpo de prova de 20 mm. A Tabela 2 apresenta a equação das retas para cada argamassa e seu respectivo coeficiente de ajuste do modelo matemático.

$$e_c = \mathrm{k}.\sqrt{t} \quad (1)$$

Onde,

e_c = espessura de carbonatação (cm);
k = equação da reta;
t = tempo em dias.

Tabela 2: Coeficientes do modelo matemático

Argamassa	k	R^2
1:0,5:6	y= 0,247x-0,1254	0,9664
1:1:6	y=0,2092x-0,1379	0,9680
1:2:6	y=0,1973x-0,2611	0,8736

Fonte: os autores.

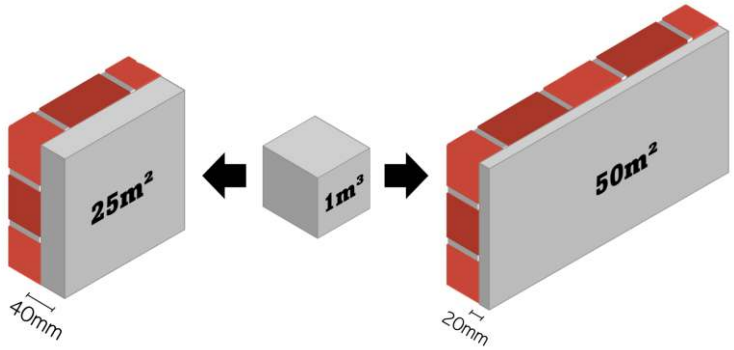
Para a definição do tempo de exposição limite para avaliação da captura de CO_2 por um revestimento argamassado, fez-se a seguinte consideração: para um edifício de 17 pavimentos produzido no Brasil para um sistema construtivo convencional, estimou-se que uma equipe levaria em torno de 6 meses para a aplicação de chapisco e emboço, considerando o tempo de mudança do balancim e intempéries que atrasam o período da obra. Com base em estimativa feita por expert em execução de obras, a argamassa de revestimento pode ficar exposta ao ar em média 6 meses[1] antes de ser aplicada sobre ela a pintura ou outro tipo de revestimento, visto que a proteção

[1]Tempo pode variar dependendo do cronograma de execução da obra e diferenças nos processos construtivos.

superficial reduz significativamente a captura de CO_2, chegando até 38,11% em 164 dias, como mostrado por Barbosa (2020). A NBR 15575 (ABNT, 2021) estabelece uma vida útil mínima de 20 anos para os sistemas de vedações verticais internas e de 40 anos para as externas. Ainda, a NBR 6118 (ABNT, 2014) orienta para estruturas de concreto armado 50 anos de vida útil. Portanto, as estimativas de captura de CO_2 foram calculadas até 50 anos de exposição para o ambiente externo protegido de intempéries.

Para a estimativa da captura com base na profundidade de carbonatação foi necessário determinar os cenários para calcular a quantidade de alvenaria (m^2) que pode ser revestida com 1 m^3 de argamassa. O primeiro cenário foi determinado seguindo as recomendações da NBR 13749 (ABNT, 2013a), no qual definiu-se que a espessura média do revestimento seria de 20 mm. A partir disso, foi possível determinar a área de alvenaria que pode ser revestida com 1 m^3 de argamassa, conforme a Figura 2, resultando em uma relação de 50m^2/m^3 de argamassa. Os demais cenários seguiram a mesma lógica para diferentes espessuras (Tabela 3), visto que, devido à falta de controle em obras, são executadas diferentes espessuras de revestimento.

Figura 2: Relação entre 1 m^3 de argamassa x área aplicável



Fonte: os autores.

Tabela 3: Descrição dos cenários para ambiente externo protegido

Cenário	Espessura (mm)	Área de superfície (m^2)
1	10,00	100,00
2	20,00	50,00
3	30,00	33,33
4	40,00	25,00
5	50,00	20,00
6	60,00	16,67
7	70,00	14,29
8	80,00	12,50

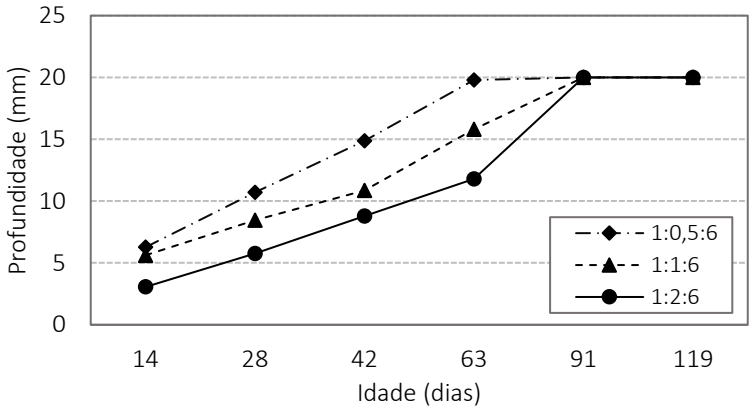
Fonte: os autores.

Assim, foi possível mensurar a partir dos resultados da análise termogravimétrica, o quanto cada argamassa capturou para cada idade em kg.CO_2/m^3. Considerou-se a superfície sem pintura ou outro tipo de revestimento. Não foram avaliadas as variáveis de concentração ambiental de CO_2, umidade relativa e precipitação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra a velocidade de carbonatação ao longo do tempo a partir das medições das profundidades das argamassas até 119 dias de exposição direta ao CO_2.

Figura 3: Profundidade de carbonatação medida ao longo do tempo em argamassas de revestimento



Fonte: os autores.

Na Figura 3 observa-se que a profundidade de carbonatação aumenta ao longo do tempo. Isso ocorre devido ao avanço temporal do CO_2 nos poros da argamassa, permitindo a reação de carbonatação. Até a idade de 91 dias, quanto menor o teor de cal, maior foi a profundidade de carbonatação. Este fato pode ser atribuído as argamassas com maior teor de cal apresentarem maior reserva alcalina, uma vez que possuem maior quantidade de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio disponível para reação química com o CO_2, fazendo com que a frente de carbonatação seja mais lenta (MAZURANA *et al.*, 2021). Após 91 dias, as três argamassas apresentaram a máxima captura, uma vez que a frente de carbonatação atingiu metade da espessura do corpo de prova (20mm)

Observa-se (Tabela 4) que quanto maior o teor de cal hidratada empregado, maior o potencial de captura de CO_2 do material. Isso deve-se à quantidade de produtos carbonatáveis disponíveis na matriz. Em argamassas mistas de cimento e cal tem-se o hidróxido de cálcio advindo do processo de hidratação do Cimento Portland, assim como os hidróxidos de cálcio e magnésio presentes na cal hidratada (MO; PANESAR, 2013). Estes produtos reagem quimicamente com o dióxido de carbono formando carbonatos de cálcio e magnésio, resultando na fixação estável de carbono. Desta maneira, para que o CO_2 avance para o interior das argamassas é necessário que esse reaja com o $Ca(OH)_2$ e o $Mg(OH)_2$, assim, a quantidade de CO_2 aprisionada no interior das argamassas a base de cal, pode ser maior com o aumento do teor de cal (MAZURANA *et al.*, 2021).

Tabela 4: Potenciais de captura de CO_2 das argamassas determinadas por termogravimetria

Argamassa	Massa inicial(g)	$CaCO_3$ capturado (%)	$MgCO_3$ capturado (%)	Total ($kg.CO_2/m^3$)
1:0,5:6	49,99	3,77	0,43	15,97
1:1:6	50,23	4,25	0,34	18,27
1:2:6	50,28	5,68	0,66	25,41

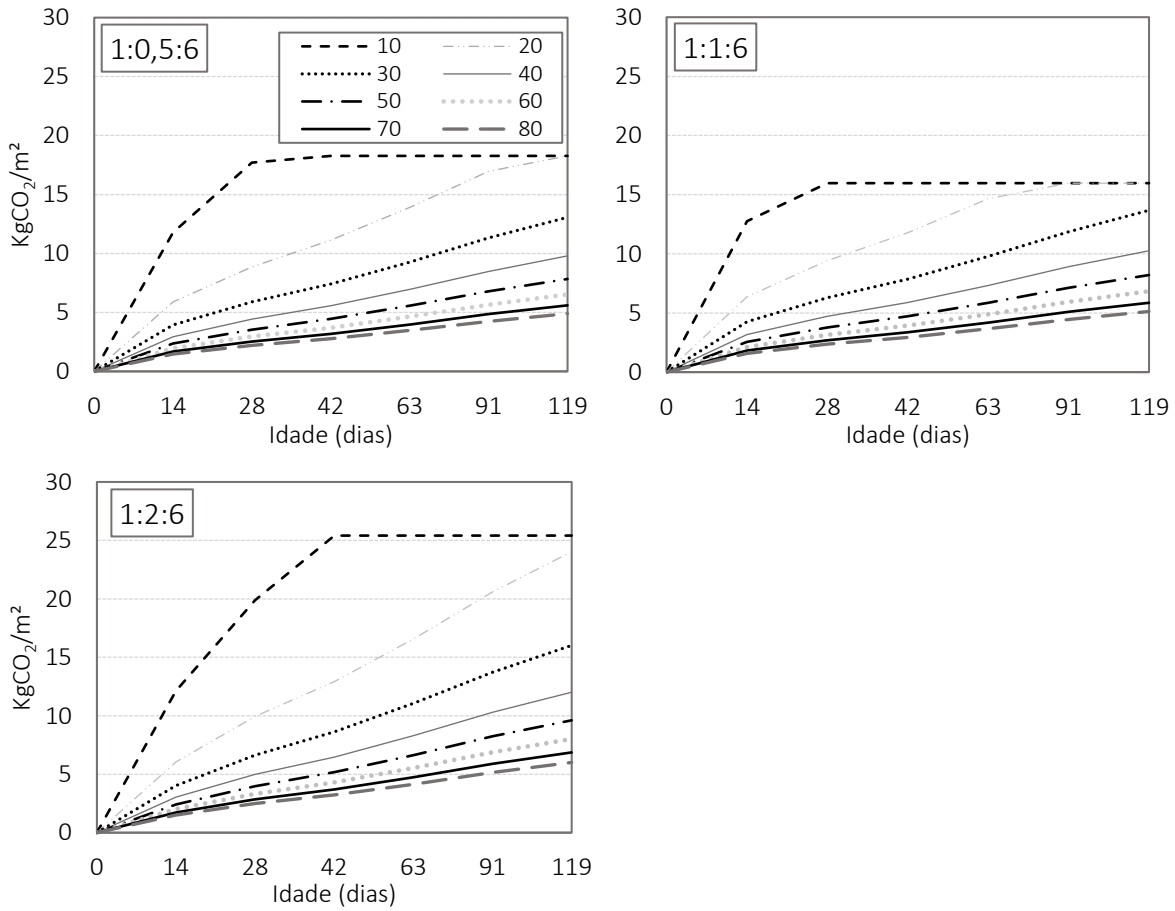
Fonte: os autores.

Em relação as emissões de CO_2 associadas à produção das argamassas de revestimento estudadas (Tabela 1), é possível observar que são diretamente proporcionais ao teor de cal hidratada utilizado. Segundo John, Punhagui e Cincotto (2014), isso se deve ao processo produtivo das cales no Brasil. A argamassa menos emissiva é 1:0,5:6 com 211,15 $KgCO_2/m^3$, 36,55% inferior à mais emissiva (1:2:6, com 332,78 $KgCO_2/m^3$). Assim, as argamassas com cal possuem maior captura de CO_2 (Tabela 4), porém sua emissão também é maior, sendo assim, a diminuição do uso do aglomerante diminui o balanço final mesmo tendo em vista que seu processo emite CO_2 de maneira significativa.

AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS

A Figura 4 apresenta a comparação da captura de CO_2 ao longo do tempo nos cenários escolhidos para cada argamassa, sendo o dado de conversão de hidróxidos em carbonatos obtido por análise térmica (Tabela 4) multiplicado pelo avanço de CO_2 ao longo de tempo que é dado pela projeção do avanço da frente de carbonatação.

Figura 4: Captura efetiva de CO_2 em função do tempo, considerando o tipo de argamassa e a profundidade de aplicação do revestimento (mm).



Fonte: os autores.

A partir da Figura 4 é possível afirmar que em menores espessuras de revestimento tem-se a máxima fixação de carbono em curtos períodos, com captura de carbono até à profundidade carbonatada ser igual à espessura do revestimento. Portanto, maior área superficial resulta em profundidades de carbonatação maiores inicialmente. Com a carbonatação total do material tem-se o esgotamento do potencial de captura de CO_2. Portanto, revestimentos que ficarão curtos períodos em contato direto com o CO_2 antes de receber uma camada de acabamento (tinta, cerâmica, etc.) certamente alcançaram seu potencial máximo de captura, se a espessura de revestimento foi da ordem de 10 mm, pois conforme Figura 3, com 28 dias de exposição a profundidade máxima de penetração de CO_2 no material foi de 10,70 mm. Considerando a espessura de aplicação do revestimento de argamassa sem acabamento superficial e sua capacidade de difusão de CO_2 ao longo do tempo, idades mais avançadas de exposição geram um valor maior de captura de CO_2.

Tabela 5: Melhor tempo necessário para a carbonatação total, em dias

Espessura (mm)	1:0,5:6	1:1:6	1:2:6
10	28	28	42
20	91	119	147
30	182	365 (1 ano)	365 (1 ano)
40	365 (1 ano)	547 (1,5 anos)	547 (1,5 anos)
50	547 (1,5 anos)	730 (2 anos)	730 (2 anos)
60	730 (2 anos)	912 (2,5 anos)	1095 (3 anos)
70	912 (2,5 anos)	1460 (4 anos)	1460 (4 anos)
80	1095 (3 anos)	1825 (5 anos)	1825 (5 anos)

Fonte: os autores.

Observa-se na Tabela 5 que espessuras superiores a 20 mm demandam tempo de exposição ao CO_2 superiores a 3 meses para a completa carbonatação e máxima fixação de carbono. Conforme ocorre o aumento da espessura, sem considerar o efeito de proteção superficial, o tempo necessário para a carbonatação completa do material é elevado de forma exponencial. Sabe-se pelo estudo de Barbosa (2020), que ao aplicar revestimento do tipo pintura a difusão de CO_2 nas argamassas é 3 vezes menor, afetando também a captura de carbono.

Para camadas de revestimento maiores que 30 mm, o tempo requerido para a difusão do CO_2 e completa carbonatação do material aplicado na construção é de 1 a 4 anos, a depender da composição da argamassa usada. Já espessuras maiores (>50 mm) levam de 4 a 20 vezes mais tempo para alcançar a máxima carbonatação quando comparadas espessuras menores (20 mm).

Seis meses de exposição não foram suficientes para todas as argamassas com espessuras maiores que 20 mm atingirem sua máxima profundidade de carbonatação e, consequentemente, seu potencial de captura de CO_2, sendo necessário um maior período em contato direto com o CO_2 antes de receber uma camada de acabamento para a completa carbonatação da camada de revestimento. Assim, espessuras maiores levam mais tempo para carbonatar por completo, porém, em edificações em que a face fica exposta por longos períodos, a argamassa pode atingir o potencial máximo de captura.

Os revestimentos muito espessos, superiores a 25 mm, advém da falta de controle de qualidade e de má execução da construção, que além de consumir materiais em excesso (perda incorporada), aumentam as emissões de CO_2 e o custo da construção por m², o que deve ser evitado.

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo indicam que a espessura do revestimento argamassado, o tipo de argamassa e o tempo de exposição ao CO_2 antes da aplicação do acabamento superficial, apresentaram influência no resultado de captura de carbono. Quanto maior o teor de cal, menor a velocidade de difusão de CO_2 e maior a fixação de carbono na argamassa de revestimento. Argamassas com proporção de 1:2:6, 1:1:6 e 1:0,5:6 (cimento:cal hidradata:areia) possuem potencial de captura de carbono de 25,4, 18,3 e 16 kg.CO_2/m³, respectivamente.

A relação m²/m³ é diretamente proporcional à fixação de carbono à matriz cimentícia; quanto maior esta relação, menor o tempo para o material ser totalmente carbonatado e, consequentemente, esgotar o potencial de captura de carbono. Espessuras superiores a 20 mm demandam tempo de exposição ao CO_2 superiores a 3 meses para a completa carbonatação e máxima fixação de carbono. Espessuras maiores que 50 mm levam de 4 a 20 vezes mais tempo para alcançar a máxima carbonatação quando comparadas espessuras menores (20 mm).

Consta-se que o controle da espessura de aplicação de argamassas de revestimento, além de garantir um menor volume de material empregado por m², evita perdas incorporadas e tem impacto nas emissões e na captura de CO_2.

Portanto, torna-se importante estudar a captura de CO_2 em argamassas a base de cimento e a influência da cal, pois podem compensar parte das emissões geradas no processo de fabricação dos materiais de construção.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Itaipu ao Laboratório de Tecnologia do Concreto Itaipu e à Unioeste pelo apoio no projeto experimental e à Fundação Unioeste pelo apoio à pesquisa. Agradecemos a Taíne Beal Silva, Eduardo Rigo e Mariana Rufatto por suas contribuições à pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro: [s. n.], 2013.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

[4] BARBOSA, M. C. **Efeito da proteção superficial do tipo pintura na captura de CO2 por carbonatação em argamassas de revestimento**. 2020. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2020.

[5] CETESB; BID. **Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no estado de São Paulo de 2014 a 2030** (K. R. G. Punhagui et al., Org.). São Paulo: CETESB, 2018. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br.

[6] CHEVER, L.; PAVÍA, S.; HOWARD, R. Physical properties of magnesian lime mortars. **Materials and Structures,** [s. l.], v. 43, n. 1–2, p. 283–296, 2010. Disponível em: https://link.springer.com/10.1617/s11527-009-9488-9.

[7] DELABONA, F. J.; GAVA, G. P.; RUFATTO, M. Avaliação do potencial de captura de CO2 em argamassas de revestimento devido à carbonatação natural. In: - 6o ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INOV, 2020, Cascavel. **6o EAICTI.** Cascavel: Unioeste, 2020.

[8] ERGENÇ, D.; FORT, R. Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO2 environments. **Construction and Building Materials,** [s. l.], v. 188, p. 314–325, 2018. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818320671.

[9] FONTOLAN, B. L. **Captura de CO2 devido a carbonatação em argamassas com agregado de resíduo de construção e demolição por meio da análise térmica.** 2021. - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021.

[10] FONTOLAN, B. L.; GAVA, G. P.; SILVA, T. B. Contribuição ao sequestro de CO2 devido a carbonatação natural de argamassas com agregado de resíduo de construção e demolição. In: 6o ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INOVAÇ, 2020, Cascavel. **6o EAICTI.** Cascavel: Unioeste, 2020.

[11] FONTOLA, B. L.; SILVA, T. B.; GAVA, G. P.; RIGO, E.; POSSAN, E. **CO_2 uptake in rendering mortars considering natural carbonation. [**No prelo].

[12] FUKUI, E. et al. CO2 liberado na produção de argamassas. In: 2013, Fortaleza. **X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassa.** Fortaleza: [s. n.], 2013.

[13] 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.

[14] 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, 2014.

[15] KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T. C. **Potential of CO2 sequestration through construction and demolition (C&D) waste - An overview.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2017.

[16] KANG, S.-H.; KWON, Y.-H.; MOON, J. Quantitative Analysis of CO2 Uptake and Mechanical Properties of Air Lime-Based Materials. **Energies,** [s. l.], v. 12, n. 15, p. 2903, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/12/15/2903.

[17] MAZURANA, L. et al. Determination of Co2 capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,** [s. l.], 2021.

[18] MO, L.; PANESAR, D. K. Accelerated carbonation – A potential approach to sequester CO2 in cement paste containing slag and reactive MgO. **Cement and Concrete Composites,** [s. l.], v. 43, p. 69–77, 2013. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513001170.

[19] PHAM, S. T. Experimental Investigation and Modelling of Carbonation Process in Cement Materials. **The Open Civil Engineering Journal,** [s. l.], v. 7, n. 1, p. 116–126, 2013. Disponível em: https://opencivilengineeringjournal.com/VOLUME/7/PAGE/116/.

[20] POSSAN, E. Captura de CO2 em materiais cimentícios. **Concreto & Construção**, [s. l.], v. 1, p. 60–66, 2019.

[21] RILEM. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 453–455, 1988. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472327. Acesso at: 29 Jun. 2021.

[22] SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A **Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.** New York: CRC Press, 2016.

[23] SNIC. **Produção nacional de cimento por regiões e estados.** [S. l.], 2020. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-industria.php.

[24] TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Stockholm: [s. n.], 1982. Disponível em: http://www.cbi.se/viewNavMenu.do?menuID=317&oid=857.

[25] UN. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.** [S. l.], 2015. Disponível em: Acesso at: 23 Jun. 2021.

[26] WIJAYASUNDARA, M.; MENDIS, P.; NGO, T. Comparative assessment of the benefits associated with the absorption of CO 2 with the use of RCA in structural concrete. **Journal of Cleaner Production,** [s. l.], v. 158, p. 285–295, 2017. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617306923.

[27] WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **GNR Project: Reporting CO2.** [S. l.], 2019. Disponível em: https://gccassociation.org/gnr/. Acesso at: 23 Jun. 2021.

[28] YANG, K. H.; SEO, E. A.; TAE, S. H. Carbonation and CO2 uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, [s. l.], v. 46, p. 43–52, 2014.