

REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂: INFLUÊNCIA NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

CO₂ EMISSION REDUCTION: INFLUENCE ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIALS

Caio César Feitosa Aragão¹

Renalle Cristina Alves De Medeiros Nascimento²

RESUMO

Os materiais cimentícios, amplamente utilizados na indústria da construção civil, desempenham um papel fundamental não apenas na infraestrutura moderna, mas também são responsáveis por significativa emissão de CO₂ ao longo de seu ciclo produtivo. A redução da emissão de CO₂ tem sido amplamente estudada como uma estratégia para melhorar a sustentabilidade e a eficiência dos materiais cimentícios e à base de cal. O objetivo deste estudo foi analisar os impactos da carbonatação acelerada e do uso de materiais modificados na micro e macroestrutura dos materiais cimentícios e à base de cal. A metodologia baseou-se em uma revisão integrativa da literatura, considerando estudos publicados entre 2019 e 2024 em bases científicas reconhecidas. Foram analisadas pesquisas que abordam a influência da carbonatação, da pressão de CO₂ e do uso de resíduos industriais na resistência mecânica e durabilidade dos materiais. Os resultados indicaram que: i) a carbonatação acelerada melhora a densidade e a resistência à compressão dos materiais, reduzindo a porosidade e aumentando a sua estabilidade química, ii) a utilização de agregados reciclados e resíduos de carvão de cálcio também se mostrou eficaz na captura de CO₂, contribuindo para a sustentabilidade do setor e iii) a redução de CO₂ nos materiais cimentícios é uma abordagem promissora para a indústria da construção, promovendo materiais mais sustentáveis e de alto desempenho. No entanto, desafios como a padronização do processo e a viabilidade econômica ainda precisam ser superados.

Palavras-chave: carbonatação acelerada; materiais cimentícios; sustentabilidade.

ABSTRACT

Cementitious materials, widely used in the construction industry, play a fundamental role not only in modern infrastructure but are also responsible for significant CO₂ emissions throughout their production cycle. The reduction of CO₂ emissions has been extensively studied as a strategy to improve the sustainability and efficiency of cementitious and lime-based materials. The aim of this study was to analyze the impacts of accelerated carbonation and the use of modified materials on the micro and macrostructure of cementitious and lime-based materials. The methodology was based on an integrative literature review, considering studies published between 2019 and 2024 in recognized scientific databases. Research addressing the influence of carbonation, CO₂ pressure, and the use of industrial residues on the mechanical strength and durability of these materials was analyzed. The results indicated that: (i) accelerated carbonation improves the density and compressive strength of the materials, reducing porosity and increasing their chemical stability; (ii) the use of recycled aggregates and calcium carbide residues has also proven effective in capturing CO₂, contributing to the sustainability of the sector; and (iii) CO₂ reduction in cementitious materials is a promising approach for the construction industry, promoting more sustainable and high-performance materials. However, challenges such as process standardization and economic feasibility still need to be overcome.

¹ Bacharelado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.

² Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande.

Keywords: accelerated carbonation; cementitious materials; sustainability.

INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios são amplamente utilizados na construção civil sendo essenciais para a fabricação de concretos, argamassas e diversos componentes estruturais. Esses materiais incluem principalmente o cimento Portland, obtido pela calcinação de calcário e argila, e a cal, derivada da decomposição térmica do calcário. A composição básica do cimento Portland inclui silicatos, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio, que, ao entrarem em contato com a água, formam produtos hidratados responsáveis pela resistência e durabilidade do material. Apesar de sua importância, o processo de fabricação do cimento convencional é um dos grandes responsáveis pela emissão global de dióxido de carbono (CO₂), principalmente devido à decomposição térmica do calcário (liberação de CO₂) e à queima de combustíveis fósseis nos fornos (Neville, 2016). Para melhor compreensão, a Figura 1 ilustra de forma esquematizada o processo de fabricação do cimento, que envolve a extração e preparação das matérias-primas, a homogeneização dos materiais, a formação do clínquer em altas temperaturas e, por fim, a moagem final com adição de aditivos, resultando no cimento utilizado nas construções.

grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera.

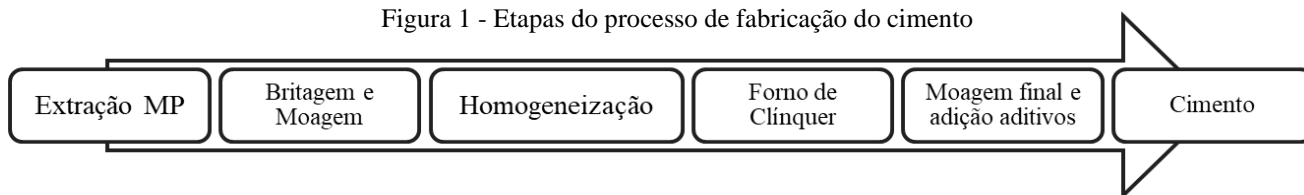
A busca por soluções sustentáveis na construção civil e na indústria de materiais tem se tornado uma necessidade global, impulsionada pelos desafios climáticos e ambientais, sendo a emissão de dióxido de carbono (CO₂) um dos fatores de maior preocupação e que tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas para sua captura e posterior reutilização em processos industriais.

A redução das emissões de CO₂ por meio da captura e reutilização desse gás em materiais construtivos representa uma estratégia promissora para a mitigação do impacto ambiental da indústria cimentícia (Iwama; Kaneko, 2022).

Dentre essas tecnologias, a carbonatação acelerada tem se mostrado uma alternativa promissora para melhorar as propriedades mecânicas e estruturais de materiais, especialmente os cimentícios e à base de cal (Yi; Wang; Guo, 2020).

Esse processo envolve a reação do CO₂ com compostos presentes no material, promovendo a formação de carbonatos estáveis que aumentam sua resistência mecânica e durabilidade.

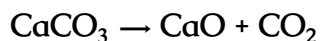
Figura 1 - Etapas do processo de fabricação do cimento



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

Durante o aquecimento do calcário (CaCO₃) no forno de clínquer, ocorre a reação química de decomposição, conforme representado na Equação 1:

Equação 1 – Decomposição térmica do carbonato de cálcio (calcário).



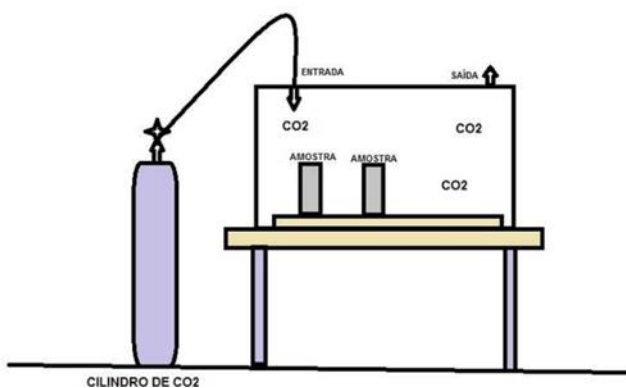
Essa reação é uma das principais fontes de emissão de CO₂ no processo, pois libera

A carbonatação, seja natural ou acelerada, influencia diretamente as características dos materiais, alterando sua porosidade, resistência à compressão e estabilidade química (Li *et al.*, 2023).

O uso de resíduos industriais e subprodutos de processos químicos, como a escória de carbonatação e resíduos de carvão de cálcio, tem sido explorado como alternativa

sustentável para a produção de materiais de construção ecologicamente corretos (Silva *et al.*, 2021). A incorporação desses subprodutos na matriz cimentícia ou cal permite uma redução significativa da pegada de carbono (medida da quantidade de gases de efeito estufa (GEE) emitidos por atividades humanas), tornando os materiais mais resistentes a esforços mecânicos e ambientalmente viáveis. Estudos recentes indicam que a aplicação de CO₂ em diferentes concentrações e pressões pode resultar em melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos materiais (Ismail; Mamirov; Hu, 2024). A Figura 2 apresenta um esquema do processo de carbonatação acelerada.

Figura 2 - Processo de carbonatação acelerada.



Fonte: Passos, Moreno Junior e Gomes, 2020.

A abordagem da carbonatação não se limita apenas a materiais cimentícios, mas também se estende ao desenvolvimento de materiais baseados em carbono para aplicações eletroquímicas. A conversão de CO₂ em materiais de carbono de alto valor agregado, como eletrocatalisadores para a redução eletroquímica de CO₂, vem sendo estudada como alternativa para fechar o ciclo do carbono e reduzir as emissões atmosféricas (Li; Huang; Li, 2020).

A modificação estrutural e a dopagem de carbono com heteroátomos, como nitrogênio e fósforo, têm sido exploradas para aprimorar a seletividade e eficiência na conversão de CO₂ em produtos químicos de interesse (Gui *et al.*, 2021).

Entre os desafios da carbonatação acelerada e do uso de materiais alternativos na captura de CO₂, está a compreensão das mudanças estruturais que ocorrem nos materiais ao longo do tempo. A influência da porosidade, da taxa de conversão de compostos hidratados e da distribuição de carbonatos formados ainda necessita de investigações detalhadas para garantir a viabilidade técnica e econômica dessas abordagens. Com base nessas questões, surge o seguinte problema de pesquisa: como a carbonatação acelerada e o uso de materiais modificados impactam a micro e macroestrutura dos materiais cimentícios e à base de cal?

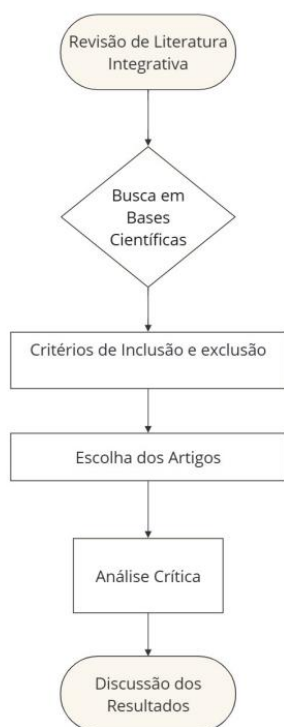
Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos do processo de carbonatação acelerada e do uso de materiais modificados na micro e macroestrutura de materiais cimentícios e à base de cal.

METODOLOGIA

As atividades desenvolvidas na elaboração deste trabalho seguiu os procedimentos descritos na Figura 3.

Para o desenvolvimento deste estudo, foi realizada uma revisão integrativa da literatura, visando analisar o impacto da redução de CO₂ nas propriedades de materiais cimentícios e à base de cal. Essa abordagem metodológica foi escolhida por permitir a síntese crítica de estudos teóricos e empíricos, conforme sugerido por Botelho, Cunha e Macedo (2011).

Figura 3 – Fluxograma com as atividades realizadas.



Fonte: elaborada pelo próprio autor.

O levantamento bibliográfico foi conduzido em bases científicas reconhecidas, como ScienceDirect, ACS Publications, Frontiers e MDPI, abrangendo publicações entre 2019 e 2024. Os critérios de inclusão consideraram a relevância dos estudos para o tema, atualidade e rigor metodológico. Foram selecionados artigos que abordavam:

1. Processos de carbonatação acelerada em materiais cimentícios.
2. Influência de variáveis como pressão, concentração de CO₂ e tempo de exposição.
3. Aplicação de resíduos industriais, como escória mineralizada e resíduos de carvão de cálcio, na melhoria das propriedades mecânicas e na sustentabilidade dos materiais.

Os dados extraídos dos estudos selecionados foram analisados qualitativamente, com foco na comparação dos resultados, identificação de padrões e destaque das contribuições mais significativas para a área. A técnica de análise de conteúdo, conforme Bardin (2011), foi utilizada para sistematizar as informações e identificar lacunas na literatura.

Na fase de seleção e classificação dos estudos, foram utilizados critérios de inclusão que priorizaram artigos atuais, revisados por pares e com ênfase no tema principal de redução de CO₂. Também foram adotados critérios de exclusão, desconsiderando artigos sem método científico claramente definido, sem critérios bem estabelecidos ou que estivessem indisponíveis para acesso completo. Ressalta-se que a definição desses critérios, bem como a análise criteriosa dos materiais selecionados, foi uma contribuição direta do autor para garantir a relevância e a qualidade das fontes utilizadas na pesquisa.

O processo de análise buscou compreender como diferentes estratégias de carbonatação e o uso de materiais alternativos impactam na densidade, porosidade, resistência mecânica e durabilidade dos materiais. Essa abordagem permitiu a construção de um panorama abrangente sobre a temática e fundamentou as discussões e conclusões apresentadas neste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos escolhidos abrangeram diferentes abordagens metodológicas, incluindo estudos experimentais e análises computacionais. Essa seleção permitiu uma análise comparativa entre os diferentes processos utilizados e as propriedades dos materiais obtidos nos estudos.

O Quadro 1 apresenta informações resumidas sobre os principais trabalhos analisados.

Quadro 1 - Informações sobre os trabalhos selecionados para o estudo

Autor(es)	Abordagem	Principais Resultados	Conclusão
Silva et al. (2021)	Comparação entre carbonatação natural e acelerada em materiais à base de cal	Carbonatação acelerada melhora resistência mecânica em curto prazo; carbonatação natural leva anos para resultados similares	Carbonatação acelerada é viável para otimização de produção de materiais sustentáveis
Yi, Wang e Guo (2020)	Uso de escória mineralizada por CO ₂ como agregado sustentável em concretos	Escória mineralizada aumenta absorção de CO ₂ , reduz permeabilidade e melhora resistência do concreto	Uso de escória mineralizada pode reduzir impacto ambiental da construção civil
Liang et al. (2024)	Impacto do pré-tratamento por micro-ondas na eficiência da carbonatação	Pré-tratamento por micro-ondas acelera penetração de CO ₂ , reduz porosidade e melhora resistência mecânica	Pré-tratamento melhora eficiência da carbonatação e pode reduzir tempo de cura
Ismail, Mamirov e Hu (2024)	Substituição de agregados reciclados tratados com CO ₂ sob diferentes pressões	Pressões mais elevadas de CO ₂ reduzem porosidade e aumentam resistência do concreto tratado	Tratamento sob alta pressão melhora qualidade do concreto e sustentabilidade
Li et al. (2023)	Carbonatação de resíduos de carvão de cálcio para captura e sequestro de CO ₂	Altas concentrações de CO ₂ promovem formação acelerada de carbonatos, melhorando resistência e sustentabilidade do material	Captura de CO ₂ via resíduos industriais pode ser uma estratégia para reduzir emissões

Fonte: elaborada pelo próprio autor.

● Efeitos do tipo de carbonatação

A carbonatação é um processo químico natural em que o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera reage com compostos alcalinos encontrados em materiais cimentícios, especialmente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando carbonato de cálcio (CaCO₃), fundamental para a melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade de materiais cimentícios e à base de cal. Os efeitos da carbonatação nos materiais podem ser avaliados pela carbonatação natural e acelerada; pelo uso de escória mineralizada por CO₂ como agregado sustentável e, pelo impacto do pré-tratamento por micro-ondas na eficiência da carbonatação.

Silva *et al.* (2021) investigaram os efeitos da carbonatação natural e acelerada em materiais à base de cal, analisando sua influência na resistência mecânica e na microestrutura. No estudo, foram preparados corpos de prova de argamassa de cal que foram submetidos a dois tipos de cura:

- Carbonatação natural: os materiais foram expostos a uma atmosfera com 0,05% de CO₂ por um período de até três anos;
- Carbonatação acelerada: os materiais foram expostos a uma atmosfera com 5% de CO₂ por um período de sete dias.

Os resultados mostraram que a carbonatação acelerada permitiu atingir um grau avançado de carbonatação em apenas sete dias, enquanto a carbonatação natural levou anos para apresentar resultados similares. A conversão de portlandita (Ca(OH)₂) em calcita (CaCO₃) ocorreu em ambas as condições, mas a carbonatação acelerada gerou cristais de calcita maiores e mais desenvolvidos,

resultando em um aumento significativo na resistência mecânica.

Deste modo, observa-se que a carbonatação acelerada pode ser uma estratégia eficiente para otimizar a produção de materiais cimentícios sustentáveis.

O estudo conduzido por Yi, Wang e Guo (2020) abordou a aplicação da escória mineralizada por CO₂ como um agregado sustentável para concretos. A escória utilizada é um subproduto da mineralização de CO₂ e possui alta capacidade de sequestrar carbono, reduzindo o impacto ambiental dos materiais de construção. O experimento consistiu na adição de escória mineralizada a misturas de concreto contendo cimento Portland. Os corpos de prova foram submetidos a uma cura com concentração controlada de CO₂ para avaliar o grau de carbonatação atingido, a resistência mecânica do material final, a densidade e a permeabilidade do concreto. Os resultados mostraram que a inclusão da escória mineralizada aumentou a capacidade de absorção de CO₂ e melhorou a densidade do concreto, reduzindo sua permeabilidade. A resistência mecânica também apresentou um incremento significativo, demonstrando que a utilização desse agregado pode ser uma estratégia viável para a produção de concretos sustentáveis e de alto desempenho.

A melhora da densidade e consequente redução de sua permeabilidade, deve-se à formação de produtos de carbonatação, como o carbonato de cálcio (CaCO₃), que preenchem os poros e vazios presentes na matriz cimentícia. Esse preenchimento contribui para uma microestrutura mais compacta e homogênea, dificultando a penetração de

agentes agressivos, como água e íons, no interior do concreto. Além disso, a escória mineralizada atua como um agente de nucleação, promovendo reações pozolânicas adicionais com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, o que colabora para o refinamento dos poros e aumento da densidade. Dessa forma, a combinação desses mecanismos explica a melhoria das propriedades físicas e mecânicas observadas, representando uma importante contribuição para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais duráveis e ambientalmente eficientes.

Liang *et al.* (2024) investigaram o efeito do pré-tratamento por micro-ondas na carbonatação precoce de materiais cimentícios. O estudo partiu da hipótese de que a aplicação de micro-ondas poderia reduzir o teor de umidade nos corpos de prova, favorecendo a absorção e a reatividade do CO₂ durante a carbonatação. Os experimentos foram conduzidos a partir de corpos de prova de cimento Portland, expostos a um pré-tratamento por micro-ondas por diferentes intervalos de tempo (1, 2, 3 e 4 horas) e logo após, os corpos de prova foram submetidos à carbonatação acelerada em uma atmosfera com 12% de CO₂. Os resultados indicaram que o pré-tratamento por micro-ondas acelerou a penetração do CO₂, permitindo uma carbonatação mais rápida e eficiente. Os corpos de prova que passaram por três horas de pré-tratamento apresentaram a maior resistência mecânica e uma microestrutura mais densa devido à formação otimizada de cristais de carbonato de cálcio.

Os três estudos analisados demonstraram diferentes abordagens para a otimização da carbonatação em materiais cimentícios e apresentaram efeitos positivos na resistência mecânica e durabilidade dos materiais cimentícios. Ressaltam ainda a importância do controle de variáveis como umidade inicial, concentração de CO₂ e tempo de exposição para maximizar os benefícios da carbonatação. A carbonatação acelerada (Silva *et al.*, 2021) mostrou-se eficaz na redução do tempo necessário para a formação de calcita, melhorando a resistência mecânica dos materiais a curto prazo, isto deve-se a formação rápida e controlada desses produtos

de carbonatação que resulta em uma estrutura mais densa e coesa, o que contribui diretamente para o aumento da resistência mecânica inicial e redução da permeabilidade. O uso de escória mineralizada (Yi, Wang; Guo, 2020) agregou benefícios ambientais e estruturais, tornando o concreto mais denso e resistente, devido à incorporação de compostos carbonatados estáveis, como o carbonato de cálcio (CaCO₃), formados durante o processo de mineralização do CO₂. Esses compostos atuam no preenchimento dos poros e vazios da matriz cimentícia, promovendo uma microestrutura mais compacta e homogênea. Já o pré-tratamento por micro-ondas (Liang *et al.*, 2024) apresentou-se como uma estratégia complementar para otimizar a eficiência da carbonatação, uma vez que o tratamento proporcionou um aumento significativo na eficiência da carbonatação, acelerando a absorção do CO₂ e melhorando a microestrutura dos materiais, em virtude da elevação localizada de temperatura e da remoção parcial da umidade interna, que aumentam a reatividade das fases presentes e ampliam a superfície específica disponível para reação. Esse processo facilita o acesso do CO₂ aos compostos alcalinos da matriz cimentícia, promovendo uma carbonatação mais rápida e uniforme, resultando em materiais mais densos, com menor porosidade e maior resistência mecânica.

Diante do exposto, percebe-se que a otimização da carbonatação pode ser alcançada por diferentes estratégias, seja pela intensificação da exposição ao CO₂, pela introdução de materiais alternativos ou pelo uso de tecnologias de pré-tratamento. A implementação dessas técnicas pode ter um impacto significativo na redução da pegada de carbono da indústria da construção, promovendo materiais mais sustentáveis e de alto desempenho.

- **Aplicações técnicas para aproveitamento de resíduos**

A influência da pressão e da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na microestrutura dos materiais tem sido amplamente investigada, uma vez que o efeito dessas variáveis pode impactar significativamente a durabilidade, resistência

mecânica e sustentabilidade dos materiais utilizados na construção civil. Neste contexto, os estudos conduzidos por Ismail, Mamirov e Hu (2024) e Li et al. (2023) analisaram diferentes abordagens para melhorar a eficiência da carbonatação e, conseqüentemente a resistência dos materiais, bem como para reduzir a pegada de carbono da indústria da construção, ou seja, avaliar a sua capacidade de sequestrar CO₂.

No estudo de Ismail, Mamirov e Hu (2024), a pesquisa concentrou-se na substituição de agregados naturais por agregados reciclados tratados sob diferentes pressões de CO₂ com o objetivo de avaliar a melhora no desempenho mecânico do concreto e sua contribuição para a redução do impacto ambiental. A metodologia utilizada consistiu em preparar amostras de concreto com diferentes proporções de agregados reciclados e submeter essas amostras a diferentes pressões de CO₂ (variando entre 0,5 MPa e 2,0 MPa) para avaliar o impacto na carbonatação. As amostras foram avaliadas quanto a resistência à compressão, porosidade e microestrutura das amostras através de técnicas como difração de raios X (XRD) e microscopia eletrônica de varredura (SEM).

Os resultados demonstraram que o tratamento sob pressões mais elevadas de CO₂ resultou em uma carbonatação mais profunda e eficiente dos agregados reciclados, tornando-os mais densos e menos porosos. Verificou-se um aumento na resistência à compressão do concreto tratado, indicando que a carbonatação sob alta pressão pode melhorar significativamente a performance mecânica dos materiais. Além disso, a redução da porosidade também sugere maior durabilidade e menor susceptibilidade a danos provocados por agentes externos.

Por outro lado, o estudo de Li *et al.* (2023) abordou a carbonatação de resíduos de carvão de cálcio como uma fonte alternativa de cal para materiais cimentícios. O processo proposto não apenas reduziu a emissão de CO₂, mas também permitiu a incorporação desse gás no material final, promovendo a captura de carbono. A metodologia envolveu o uso de resíduos de carvão de cálcio, como substituto parcial do cimento em misturas cimentícias; a exposição das amostras a atmosferas com

concentrações controladas de CO₂, para avaliar o grau de carbonatação e; a caracterização das amostras quanto à formação de compostos carbonatados, para avaliar a resistência mecânica e durabilidade.

Os resultados indicaram que a incorporação de resíduos de carvão de cálcio promoveu uma significativa absorção de CO₂, reduzindo a pegada de carbono do material. A reação com o gás resultou na formação de carbonato de cálcio, que contribuiu para o aumento da resistência e estabilidade das amostras, de modo que concentrações mais altas (acima de 20%) promoveram a formação acelerada de produtos de carbonatação. No entanto, o estudo também apontou que a eficiência da carbonatação depende diretamente da concentração de CO₂ e do tempo de exposição, sendo necessário otimizar esses parâmetros para aplicações industriais, de modo a garantir melhoria da microestrutura e resistência mecânica dos materiais carbonatados.

Ao comparar os dois estudos, percebe-se que ambos demonstram a viabilidade da carbonatação como estratégia para melhorar a qualidade dos materiais cimentícios e reduzir emissões de CO₂. Enquanto Ismail, Mamirov e Hu (2024) enfatizam o efeito da pressão na carbonatação de agregados reciclados e seu impacto na resistência do concreto. Li et al. (2023) destacam o potencial de materiais alternativos para sequestrar CO₂ e melhorar a sustentabilidade dos produtos à base de cimento. Dessa forma, ambos os estudos corroboram a importância de explorar diferentes variáveis da carbonatação para otimizar o desempenho mecânico e ambiental dos materiais de construção.

Ambos os estudos demonstraram que o controle da carbonatação por meio da pressão e da concentração de CO₂ pode otimizar significativamente a performance dos materiais de construção. De modo que, o aumento da pressão melhora a densificação do material até certo limite, após o qual os ganhos são reduzidos (Ismail, Mamirov e Hu (2024) e que altas concentrações de CO₂ promovem maior eficiência na conversão de resíduos de carvão de cálcio em material cimentício funcional, indicando uma estratégia

promissora para capturar CO₂ industrial (Li et al. (2023)).

- **Viabilidade econômica e ambiental**

A adoção de tecnologias para captura e reaproveitamento de CO₂ em materiais cimentícios também depende de sua viabilidade econômica e ambiental. Por isso, este tópico aborda estudos que analisam os custos, desafios e benefícios associados a essas práticas, destacando seu potencial para promover sustentabilidade e economia circular na construção civil.

Como já comentado, Li *et al.* (2023) propõem o uso de resíduos industriais na produção de materiais cimentícios como estratégia para mitigar as emissões de CO₂. Essa abordagem não apenas reduz a pegada de carbono da indústria cimenteira, mas também promove a economia circular ao transformar resíduos em materiais utilizados na construção civil. Os autores ainda discutem a viabilidade econômica da carbonatação de resíduos industriais, destacando que a implementação dessa tecnologia em grande escala pode ser limitada pelos altos custos operacionais, uma vez que há a necessidade de infraestrutura especializada, transporte e processamento dos resíduos de carbetão de cálcio para a captura de CO₂ que eleva os custos de produção. Eles destacam que, para tornar essa abordagem mais viável, é necessário desenvolver incentivos financeiros e regulamentações que favoreçam a adoção de tecnologias de captura e reutilização de CO₂.

Ismail, Mamirov e Hu (2024) estudam a viabilidade do uso de concreto com agregados reciclados tratados com CO₂, destacando sua sustentabilidade e melhoria nas propriedades mecânicas. Esse método permite a reutilização de resíduos da construção, reduzindo a necessidade de extração de novos materiais. Yi, Wang e Guo (2020) discutem a aplicação da escória mineralizada por CO₂ como substituto de agregados convencionais, sugerindo que essa abordagem pode melhorar a durabilidade e reduzir o impacto ambiental dos materiais de construção.

Zhao *et al.* (2023) analisam como materiais de carbono de alto valor agregado derivados do CO₂ podem ser aplicados no armazenamento de energia. Esses avanços

tecnológicos ampliam as possibilidades de reaproveitamento do CO₂ capturado, indo além da construção civil e alcançando o setor de energia. A melhoria nos processos de captura e utilização do CO₂ pode tornar a indústria mais eficiente e ambientalmente responsável.

Yi, Wang e Guo (2020) enfatizam a necessidade de otimizar os processos de carbonatação para reduzir custos e melhorar a eficiência da captura de CO₂. Em seu estudo, os pesquisadores analisaram a aplicação de escória mineralizada por CO₂ como agregado sustentável na construção civil, destacando que a melhoria dos métodos de carbonatação pode tornar essa alternativa mais atrativa economicamente. Os autores sugerem o uso de técnicas avançadas para acelerar a reação de carbonatação e aumentar a taxa de absorção de CO₂, reduzindo o tempo de cura dos materiais e, conseqüentemente, os custos operacionais. Yi, Wang e Guo (2020) também apontam que, embora a aplicação de materiais carbonatados tenha demonstrado benefícios em laboratório, a transição para a produção em massa requer adaptações na cadeia produtiva. A integração dessa tecnologia nos processos tradicionais da indústria da construção civil demanda investimentos em pesquisa e desenvolvimento para adaptar os materiais a diferentes condições de aplicação.

Apesar dos desafios, a literatura mostra que o uso de resíduos industriais, a carbonatação acelerada e os tratamentos complementares, como o micro-ondas, aumentam a durabilidade e resistência dos materiais. Isso reduz custos de manutenção e prolonga a vida útil das estruturas, gerando economia ao longo do ciclo de vida e contribuindo com a redução das emissões de CO₂.

Diante desses achados, o impacto do processo de redução de CO₂ nas propriedades do material se traduz em benefícios significativos para a indústria da construção, proporcionando materiais mais resistentes, duráveis e sustentáveis. No entanto, desafios relacionados à viabilidade econômica, regulamentação e infraestrutura necessária para a ampliação do uso dessas técnicas ainda precisam ser superados. Estudos futuros devem explorar estratégias para otimizar os processos de carbonatação, reduzir custos

operacionais e ampliar a aplicação dessas tecnologias em larga escala, consolidando sua contribuição para a sustentabilidade do setor.

Entretanto, ainda é necessário aprofundar a análise do equilíbrio entre os altos investimentos iniciais e os ganhos ambientais e econômicos que podem ser obtidos ao longo do tempo, o que demanda a elaboração de modelos integrados de viabilidade. Embora a captura e o uso do CO₂ melhorem as propriedades mecânicas dos materiais e contribuam para reduzir as emissões, tornando as construções mais sustentáveis, o custo para implementar essas tecnologias ainda é elevado. Por isso, a viabilidade dessas soluções depende fortemente do avanço tecnológico, de políticas públicas específicas e de incentivos econômicos que possam viabilizar sua aplicação em larga escala.

Assim, os estudos analisados indicam que, embora existam barreiras econômicas e tecnológicas, os ganhos ambientais e os benefícios futuros associados à carbonatação e ao uso de resíduos industriais evidenciam o potencial dessas soluções como estratégias eficazes para fortalecer a economia circular e diminuir a pegada de carbono no setor da construção civil.

CONCLUSÃO

Com base no exposto foi possível concluir que:

- i) A carbonatação acelerada proporciona um aumento significativo na resistência mecânica dos materiais em um período reduzido.
- ii) A conversão mais rápida da portlandita em carbonato de cálcio gera uma estrutura mais densa e resistente, sendo uma estratégia viável para otimizar processos produtivos na indústria da construção civil, reduzindo prazos de cura e melhorando o desempenho dos materiais.
- iii) Parâmetros como pressão e concentração do gás exercem impacto direto na eficiência da carbonatação. Pressões mais elevadas, até um limite ótimo, favorecem uma maior penetração do CO₂ na estrutura do material, acelerando a formação de carbonatos estáveis e melhorando a compacidade da matriz cimentícia.
- iv) O uso de agregados reciclados tratados com CO₂ e de subprodutos industriais, como a escória mineralizada e os resíduos de carbo

de cálcio, contribui para a redução da pegada de carbono dos materiais cimentícios. A incorporação desses materiais melhora a resistência à compressão, reduz a porosidade e aumenta a estabilidade estrutural.

De forma geral, este estudo aponta implicações práticas relevantes para a indústria da construção civil e para a gestão ambiental, uma vez que a adoção de algumas técnicas pode contribuir significativamente para a produção de materiais sustentáveis, promovendo a redução das emissões de CO₂ e a melhoria das propriedades mecânicas dos produtos cimentícios.

Destaca-se ainda a importância da pesquisa e do desenvolvimento de novas tecnologias para a captura e reutilização de CO₂ na indústria da construção. A busca por soluções inovadoras, sustentáveis e economicamente viáveis é essencial para promover a transição para um setor mais eficiente e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2011.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GUI, Meei Mei; LEE, W. P. Cathie; PUTRI, Lutfi Kurnianditia; KONG, Xin Ying; TAN, Lling-Lling; CHAI, Siang-Piao. Recent technological advancements in the photoreduction of CO₂. **Frontiers in Chemistry**, v. 9, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2021.749836/full>. Acesso em: 19 jan. 2025.

ISMAIL, Fouad Ismail; MAMIROV, Miras; HU, Jiong. Enhancing Performance and Reducing Environmental Impact of Concrete with Replacement of Recycled Concrete Aggregate Treated with Various CO₂ Pressures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], 27 jul. 2024. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/03611981241260689> Acesso em: 19 jan. 2025.

IWAMA, R.; KANEKO, H. Integration of Materials and Process Informatics: Metal Oxide and Process Design for CO₂ Reduction. **ACS Omega**, v. 7, n. 50, p. 46922–46934, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c06008>. Acesso em: 20 fev. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

LI, CHEN; LI, YI; ZHU, WEIHAO; ZENG, GUANG; OUYANG, ZHENKUI; CHENG, MINGZHAO; JIANG, ZHENGWU. Materiais de Construção Curados com CO₂: Uma Abordagem para a Descarbonização da Indústria do Carbetto de Cálcio. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 186, 2023. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023RSERv.18613688L/abstract> Acesso em: 27 jan. 2025..

LI, Leigang; HUANG, Yang; LI, Yanguang. Carbonaceous materials for electrochemical CO₂ reduction. **EnergyChem**, v. 2, n. 1, p. 100024, jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589778019300272>. Acesso em: 25 jan. 2025.

LIANG, X.; LI, M.; WANG, L.; LIU, S. Effect of Microwave Pretreatment on the Properties and Microstructure of Low-Concentration Carbon Dioxide Early Cured Cement-Based Materials. **Buildings**, v. 14, n. 4, p. 1074, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14041074>. Acesso em: 25 jan. 2025.

MAYRING, P. **Qualitative Content Analysis: Theoretical Foundation, Basic Procedures and Software Solution**. Klagenfurt: Beltz Juventa, 2014.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 20, n. 2, p. v-vi, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ape/a/z7zZ4Z4GwYV6FR7S9FHTByr/>. Acesso em: 2 fev. 2025.

SILVA, B. A.; FERREIRA PINTO, A. P.; GOMES, A.; CANDEIAS, A. Effects of natural and accelerated carbonation on the properties of lime-based materials. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 49, p. 101552, 2021. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101552. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982021001190>. Acesso em: 5 fev. 2025.

SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo)**, v. 8, n. 1, p. 102-106, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eins/a/ZQTBkVJZqcWrTT34cXLjtBx/?lang=en>. Acesso em: 12 fev. 2025.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8551.00375>. Acesso em: 12 fev. 2025.

YI, Zhenwei; WANG, Tao; GUO, Ruonan. Sustainable building material from CO₂ mineralization slag: Aggregate for concretes and effect of CO₂ curing. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 40, p. 101196, set. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982020302444>. Acesso em: 29 jan. 2025.

ZHAO, C. *et al.* Recent advances in high value-added carbon materials prepared from carbon dioxide for energy storage applications. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 9, p. 100144, dez. 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772656823000489?dgcid=rss_sd_all. Acesso em: 4 fev. 2025..

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde para superar cada desafio ao longo dessa caminhada.

Agradeço à minha namorada, Letícia, pelo amor, paciência, incentivo e por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre me apoiando a seguir em frente.

Aos meus pais e familiares, que sempre acreditaram em mim, me apoiaram incondicionalmente e foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao corpo docente do curso de Engenharia de Materiais da UACSA, por todo o apoio, direcionamento e conhecimento transmitido durante minha formação acadêmica, em especial à Professora Renalle, pela dedicação, paciência e incentivo ao longo do curso e dos trabalhos importantes.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui o meu sincero agradecimento.