

**CAPTURE QUÍMICA E
MINERALIZAÇÃO DO
DIÓXIDO DE CARBONO:
REINTERPRETAÇÃO DE
EVIDÊNCIAS
EXPERIMENTAIS E
APLICAÇÕES EM MATERIAIS
CIMENTÍCIOS
SUSTENTÁVEIS**

**CHEMICAL CAPTURE AND MINERALIZATION OF CARBON DIOXIDE:
REINTERPRETATION OF EXPERIMENTAL EVIDENCE AND APPLICATIONS
IN SUSTAINABLE CEMENTITIOUS MATERIALS**

Ciências Exatas e da Terra • 07/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/786068556](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/786068556)

Milton Maia Filho

RESUMO

A captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) constitui estratégia relevante para a mitigação das emissões de dióxido de carbono. Este estudo reinterpreta criticamente evidências experimentais previamente obtidas sobre captura química de CO₂, formação de carbonato de cálcio e aplicação em materiais cimentícios, integrando-as à literatura científica contemporânea. A análise indica convergência entre os resultados do estudo-base e os atuais fundamentos da mineralização do carbono, especialmente quanto à precipitação de CaCO₃ como forma estável de armazenamento mineral. Também são discutidos o potencial de incorporação do material obtido em matrizes cimentícias, as contribuições para a economia circular e as limitações relacionadas à caracterização microestrutural, à ampliação de escala e às avaliações ambiental e tecnoeconômica. Conclui-se que a reinterpretação de resultados experimentais consolidados pode ampliar sua relevância científica e tecnológica frente aos desafios atuais de descarbonização industrial.

Palavras-chave: captura de carbono; CCUS; mineralização de CO₂; carbonato de cálcio; materiais cimentícios sustentáveis.

ABSTRACT

Carbon capture, utilization and storage (CCUS) is an important strategy for mitigating carbon dioxide emissions. This study critically reinterprets previously obtained experimental evidence on chemical CO₂ capture, calcium carbonate formation and application in cementitious materials, integrating it with contemporary scientific literature. The analysis indicates convergence between the base-study results and current principles of carbon mineralization, particularly regarding CaCO₃ precipitation as a stable form of mineral storage. The potential incorporation of the obtained material

into cementitious matrices, contributions to the circular economy, and limitations related to microstructural characterization, scale-up, and environmental and techno-economic assessments are also discussed. It is concluded that the reinterpretation of consolidated experimental results may broaden their scientific and technological relevance in the face of current industrial decarbonization challenges.

Keywords: carbon capture; CCUS; CO₂ mineralization; calcium carbonate; sustainable cementitious materials.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios científicos, ambientais e socioeconômicos do século XXI, sendo atribuídas principalmente ao aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO₂). O aumento contínuo dessas emissões tem intensificado o aquecimento global, promovendo alterações climáticas, acidificação dos oceanos e impactos significativos sobre os ecossistemas e as atividades humanas.¹⁻⁴

A indústria do cimento destaca-se entre os principais setores emissores de CO₂, em razão da calcinação do calcário e do elevado consumo energético associado à produção de clínquer. Em consequência, estratégias voltadas à redução da intensidade de carbono desse setor têm sido consideradas prioritárias para o alcance das metas internacionais de neutralidade climática.⁵⁻⁸

Entre as estratégias atualmente investigadas para a mitigação das emissões destaca-se a captura, utilização e armazenamento de carbono, especialmente por meio da mineralização do dióxido de

carbono. Esse processo converte o CO₂ em carbonatos estáveis, promovendo seu armazenamento permanente e possibilitando aplicações em materiais cimentícios, concretos e outros produtos da construção civil.⁹⁻¹³

Embora a literatura recente apresente avanços significativos na mineralização do carbono, diversos estudos experimentais desenvolvidos anteriormente à consolidação desse campo permanecem pouco explorados sob a perspectiva dos conhecimentos atuais. A reinterpretação dessas evidências pode ampliar a compreensão dos mecanismos envolvidos e evidenciar contribuições científicas ainda pouco reconhecidas.¹⁰⁻¹³

O presente estudo propõe uma integração crítica entre evidências experimentais previamente obtidas e a literatura científica contemporânea sobre captura mineral de dióxido de carbono, formação de carbonato de cálcio e materiais cimentícios sustentáveis. Ao reinterpretar os resultados experimentais à luz dos avanços recentes em CCUS e descarbonização industrial, o trabalho oferece uma contribuição original para a compreensão do potencial da mineralização do carbono como estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e de desenvolvimento de tecnologias voltadas à construção civil de menor impacto ambiental.⁹⁻¹³

2. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, exploratória e de integração crítica entre evidências experimentais previamente obtidas e a literatura científica contemporânea. Diferentemente de uma revisão sistemática ou de

uma meta-análise, o objetivo metodológico consistiu em reinterpretar os resultados experimentais do estudo-base à luz dos avanços recentes relacionados à captura, utilização e armazenamento de carbono, à mineralização do dióxido de carbono e ao desenvolvimento de materiais cimentícios de baixa emissão de carbono.^{1-4,9}

A pesquisa foi desenvolvida mediante levantamento bibliográfico em bases de reconhecida relevância científica, incluindo PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, complementadas por documentos técnicos de organismos internacionais, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas e a Agência Internacional de Energia. Foram priorizadas publicações com revisão por pares, documentos técnicos e revisões de elevada qualidade metodológica relacionados aos mecanismos de captura química de CO₂, mineralização do carbono, formação de carbonato de cálcio, materiais cimentícios sustentáveis e estratégias de descarbonização industrial.⁵⁻¹³

Os critérios de inclusão compreenderam estudos publicados preferencialmente nas últimas duas décadas, sem prejuízo da incorporação de trabalhos clássicos indispensáveis à compreensão dos fundamentos físico-químicos da mineralização do carbono. Foram excluídos estudos com insuficiente descrição metodológica, duplicidades e publicações sem relação direta com os objetivos desta investigação.

A análise foi conduzida por meio de integração crítica entre os resultados experimentais do estudo-base e as evidências disponíveis na literatura científica, buscando identificar convergências, divergências, avanços conceituais e perspectivas de aplicação

tecnológica. Essa abordagem permitiu contextualizar os achados experimentais no cenário científico atual, preservando sua fidelidade metodológica e evitando extrapolações além das evidências efetivamente disponíveis.

Por tratar-se de estudo fundamentado em resultados experimentais previamente obtidos e em literatura científica de domínio público, esta pesquisa não envolveu coleta adicional de dados em seres humanos ou animais, não demandando submissão a Comitê de Ética em Pesquisa.

Originalidade e Contribuição Científica do Estudo

A captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e a mineralização acelerada do dióxido de carbono têm recebido crescente atenção da comunidade científica como estratégias para a mitigação das mudanças climáticas e a descarbonização da indústria cimenteira. Entretanto, diversos estudos experimentais desenvolvidos antes da consolidação desse campo científico permanecem pouco contextualizados à luz dos avanços mais recentes.

Nesse contexto, o presente artigo apresenta uma abordagem original ao integrar criticamente os resultados experimentais de um estudo-base com o estado da arte da literatura internacional sobre captura mineral de dióxido de carbono, formação de carbonato de cálcio e aplicação em materiais cimentícios sustentáveis. Essa integração não se limita à atualização bibliográfica, mas reinterpreta as evidências experimentais à luz dos conhecimentos atualmente disponíveis sobre mecanismos de mineralização, caracterização

microestrutural, durabilidade dos materiais cimentícios e estratégias de descarbonização industrial.^{2-6,9}

Assim, a principal contribuição científica deste manuscrito consiste em demonstrar que os resultados experimentais originalmente obtidos permanecem consistentes com o conhecimento contemporâneo e podem ser compreendidos como uma contribuição relevante para o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao armazenamento mineral permanente de carbono, à economia circular e à produção de materiais cimentícios de menor impacto ambiental.^{3,4,9-13}

Objetivos do Estudo

Objetivo Geral

Reinterpretar criticamente os resultados experimentais de um estudo-base sobre captura química de dióxido de carbono, formação de carbonato de cálcio e sua aplicação em materiais cimentícios, integrando essas evidências aos avanços científicos recentes relacionados à captura, utilização e armazenamento de carbono, à mineralização acelerada do CO₂ e ao desenvolvimento de materiais cimentícios de baixa emissão de carbono.^{2-4,9}

Objetivos específicos

- Analisar os fundamentos físico-químicos da captura e da mineralização do dióxido de carbono descritos no estudo-base e confrontá-los com o estado atual do conhecimento científico.¹⁻⁶

- Avaliar criticamente a formação do carbonato de cálcio como mecanismo de armazenamento mineral permanente de carbono e discutir sua estabilidade à luz da literatura contemporânea.²⁻⁶
- Integrar os resultados experimentais obtidos no estudo-base com pesquisas recentes sobre materiais cimentícios sustentáveis, destacando convergências, limitações e perspectivas tecnológicas.⁹⁻¹³
- Discutir as implicações científicas e tecnológicas da utilização do carbonato de cálcio proveniente da captura de CO₂ para a descarbonização da indústria cimenteira e para o desenvolvimento de estratégias de economia circular.⁹⁻¹³

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fundamentos Físico-Químicos da Captura e da Mineralização do Dióxido de Carbono

A captura química do dióxido de carbono fundamenta-se em uma sequência de equilíbrios físico-químicos iniciada pela dissolução do CO₂ em meio aquoso, processo descrito pela Lei de Henry. Uma vez dissolvido, o dióxido de carbono reage com a água formando ácido carbônico (H₂CO₃), que se dissocia sucessivamente em íons bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻), conforme as condições de pH do sistema.¹⁻⁴

Na presença de íons cálcio (Ca²⁺), esses equilíbrios favorecem a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO₃), constituindo mecanismo de armazenamento mineral estável do carbono. Esse processo reduz a possibilidade de reemissão do dióxido de carbono

para a atmosfera e representa uma das estratégias mais promissoras de captura permanente de carbono.⁵⁻⁸

Os resultados experimentais do estudo-base evidenciaram a formação de material compatível com a precipitação de carbonato de cálcio, demonstrando a viabilidade da captura química do dióxido de carbono nas condições experimentais avaliadas. Embora conduzidos anteriormente ao desenvolvimento mais recente das pesquisas em CCUS, esses resultados mostram-se convergentes com o entendimento contemporâneo acerca dos mecanismos de mineralização do carbono.^{3,9-12}

Sob a perspectiva atual, a mineralização do dióxido de carbono transcende a condição de simples reação química, constituindo estratégia tecnológica voltada à mitigação das mudanças climáticas, à valorização do carbono capturado e ao desenvolvimento de materiais cimentícios de menor intensidade de emissões.⁹⁻¹³

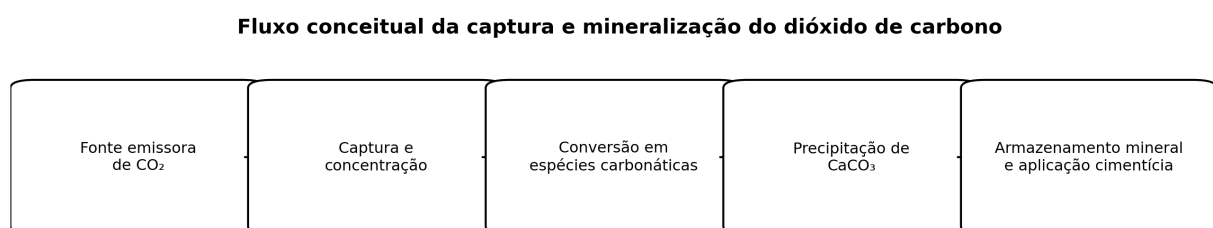


Figura 1. Fluxo conceitual da captura e mineralização do dióxido de carbono.

Fonte: elaboração do autor.

3.2. Caracterização e Estabilidade do Carbonato de Cálcio Formado Durante a Captura de CO₂

A precipitação do carbonato de cálcio constitui a etapa central da mineralização do dióxido de carbono, convertendo um gás de efeito

estufa em fase mineral termodinamicamente estável. A natureza cristalina do CaCO_3 formado depende de fatores como pH, temperatura, supersaturação da solução, velocidade de nucleação, concentração de íons cálcio e carbonato, bem como da presença de impurezas e aditivos capazes de influenciar a cinética de cristalização.¹⁻⁴

O carbonato de cálcio pode cristalizar principalmente nas formas de calcita, aragonita e vaterita. Entre esses polimorfos, a calcita representa a fase mais estável em condições ambientais, enquanto a aragonita e a vaterita correspondem a fases metaestáveis que, ao longo do tempo, tendem a transformar-se em calcita.⁵⁻⁸

Técnicas analíticas como difração de raios X, espectroscopias FTIR e Raman, microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia por dispersão de energia e análise termogravimétrica permitem caracterizar a estrutura, a morfologia, a composição química e a estabilidade térmica dos carbonatos formados.^{6, 12}

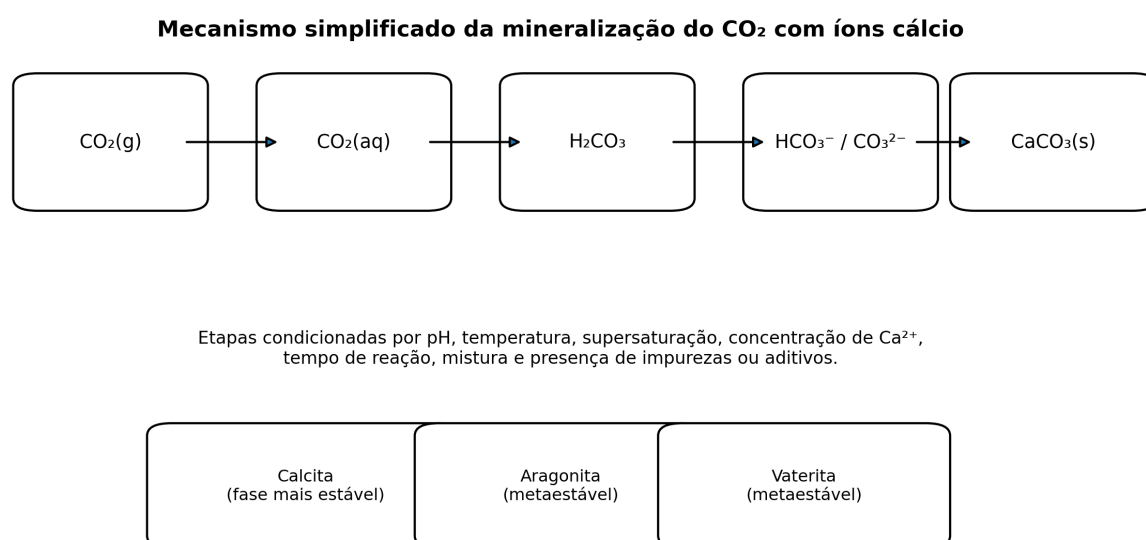


Figura 2. Mecanismo simplificado da mineralização do CO_2 na presença de íons cálcio.

Fonte: elaboração do autor.

Tabela 1. Fatores que influenciam a formação e a estabilidade do carbonato de cálcio.

Fator	Efeito principal	Implicação experimental
pH	Controla a distribuição entre $\text{CO}_2(\text{aq})$, bicarbonato e carbonato	Meios mais alcalinos favorecem a disponibilidade de CO_3^{2-}
Temperatura	Modifica solubilidade, cinética e seleção de polimorfos	Deve ser registrada e controlada durante a reação
Supersaturação	Determina nucleação e crescimento cristalino	Valores elevados podem aumentar a precipitação e alterar a morfologia
Concentração de Ca^{2+}	Define a disponibilidade do cátion para formação de CaCO_3	Afeta rendimento e taxa de precipitação
Tempo e mistura	Influenciam transferência de massa e maturação dos cristais	Necessitam padronização para comparabilidade
Impurezas e aditivos	Podem inibir ou favorecer fases cristalinas específicas	Devem ser identificados na interpretação dos resultados

Fonte: elaboração do autor.

3.3. Integração Crítica Entre os Resultados Experimentais do Estudo-Base e a Literatura Científica Contemporânea

Os resultados experimentais obtidos no estudo-base demonstraram a viabilidade da captura química do dióxido de carbono mediante sua conversão em carbonato de cálcio, evidenciando mecanismo de mineralização compatível com os princípios físico-químicos

atualmente reconhecidos. Embora desenvolvida em contexto anterior à consolidação das pesquisas em CCUS, essa investigação antecipou aspectos hoje considerados estratégicos para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.^{3,9}

A literatura contemporânea demonstra que a mineralização do CO₂ constitui uma das alternativas mais seguras para o armazenamento permanente de carbono, uma vez que converte um gás de efeito estufa em composto mineral estável e de ampla ocorrência natural. Estudos recentes também destacam o potencial de utilização do carbonato de cálcio produzido em aplicações industriais, especialmente na produção de materiais cimentícios, concretos de menor pegada de carbono e materiais compósitos destinados à construção civil sustentável.⁹⁻¹³

Quando analisados em conjunto, os resultados experimentais do estudo-base e as evidências científicas atualmente disponíveis revelam convergência conceitual. O mecanismo de precipitação observado apresenta coerência com os modelos aceitos para a nucleação e o crescimento de cristais de carbonato de cálcio, bem como com as estratégias modernas de mineralização acelerada.^{2,5,8}

Essa convergência não implica afirmar que o estudo-base contemplou todas as abordagens atualmente empregadas. Os avanços recentes incorporaram técnicas analíticas mais sofisticadas, modelagem computacional, análises de ciclo de vida, avaliações tecnoeconômicas e estudos em escala piloto. A contribuição deste artigo consiste em reinterpretar criticamente os resultados originais à luz desse novo cenário, preservando a fidelidade às evidências obtidas.¹⁰⁻¹³

Tabela 2. Integração entre as evidências do estudo-base e o conhecimento contemporâneo.

Evidência ou tema	Interpretação no estudo-base	Reinterpretação contemporânea	Validação complementar recomendada
Formação de precipitado	Indício de reação do CO ₂ com espécie cálcica	Conversão mineral compatível com formação de CaCO ₃	DRX, FTIR/Raman e análise química
Estabilidade do produto	Persistência do material sólido obtido	Potencial armazenamento mineral permanente	Ensaio de estabilidade, lixiviação e envelhecimento
Aplicação em materiais cimentícios	Possibilidade de uso do sólido produzido	Valorização do carbono capturado e economia circular	Resistência mecânica, durabilidade e microestrutura
Escala experimental	Demonstração de viabilidade em condições controladas	Base para desenvolvimento tecnológico	Escala piloto, LCA e avaliação tecnoeconômica

Fonte: elaboração do autor.

3.4. Implicações para a Descarbonização da Indústria Cimenteira e Perspectivas Tecnológicas

A indústria cimenteira ocupa posição estratégica entre os setores industriais com maiores emissões de dióxido de carbono, em razão da decomposição térmica do calcário durante a produção de clínquer e do elevado consumo energético associado ao processo. A

busca por tecnologias capazes de reduzir a intensidade de carbono da cadeia produtiva tornou-se prioridade em programas internacionais voltados à neutralidade climática e ao desenvolvimento sustentável.⁵⁻⁹

Nesse contexto, a mineralização do dióxido de carbono apresenta vantagens por combinar a captura permanente do carbono com a possibilidade de obtenção de materiais minerais potencialmente incorporáveis a matrizes cimentícias. Diferentemente de estratégias baseadas exclusivamente no armazenamento geológico, a mineralização permite agregar valor ao carbono capturado por meio de sua transformação em produtos estáveis, favorecendo abordagens alinhadas à economia circular.⁹⁻¹³

A reinterpretação dos resultados do estudo-base demonstra que os mecanismos de precipitação do carbonato de cálcio observados experimentalmente mantêm consonância com estratégias atualmente investigadas para a produção de materiais cimentícios de menor impacto ambiental. Embora o estudo original não tenha sido concebido com foco específico na descarbonização industrial, seus resultados são compatíveis com conceitos que atualmente orientam pesquisas sobre redução das emissões de CO₂ na construção civil.^{3, 9-13}

A literatura também destaca a integração da captura mineral de carbono com resíduos industriais ricos em cálcio e magnésio, escórias siderúrgicas, cinzas e resíduos de demolição, ampliando a reutilização de materiais e reduzindo a demanda por matérias-primas naturais. Entretanto, a consolidação dessas tecnologias em escala industrial ainda depende da eficiência dos processos, consumo energético, disponibilidade de matérias-primas,

viabilidade econômica e comprovação do desempenho de longo prazo.¹⁰⁻¹³

Tabela 3. Síntese dos mecanismos de captura, mineralização e aplicação tecnológica.

Etapas ou processos	Produtos ou transformações	Benefícios ambientais	Aplicações potenciais
Captura química	CO ₂ separado ou concentrado	Redução da liberação direta para a atmosfera	Integração a rotas CCUS
Conversão carbonática	H ₂ CO ₃ , HCO ₃ ⁻ e CO ₃ ²⁻	Disponibilização do carbono para reação mineral	Precipitação controlada de carbonatos
Mineralização	Carbonatos sólidos estáveis	Armazenamento de longa duração	Valorização de resíduos ricos em Ca e Mg
Precipitação com Ca ²⁺	Carbonato de cálcio	Fixação mineral do carbono	Fíler e adição cimentícia
Incorporação em matriz cimentícia	Argamassas, pastas ou concretos modificados	Potencial redução da pegada de carbono	Materiais de construção sustentáveis

Fonte: elaboração do autor.

3.5. Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras

Os resultados discutidos devem ser interpretados considerando as características metodológicas do estudo-base e o contexto científico em que foi originalmente desenvolvido. À época de sua realização, diversas metodologias hoje amplamente empregadas em pesquisas sobre captura e mineralização de dióxido de carbono ainda não

estavam consolidadas, especialmente aquelas relacionadas à caracterização microestrutural avançada, à modelagem computacional e às avaliações integradas de desempenho ambiental e econômico.

A presente investigação não teve como objetivo reproduzir experimentalmente os resultados originais nem incorporar retrospectivamente técnicas inexistentes ou de uso restrito no período de realização do estudo-base. Sua finalidade consistiu em reinterpretar criticamente essas evidências à luz dos avanços científicos alcançados, preservando a fidelidade metodológica da pesquisa original.⁹⁻¹³

Como perspectivas futuras, recomendam-se a caracterização detalhada dos produtos de mineralização por DRX, FTIR, Raman, MEV/EDS e TGA; a ampliação de escala; a integração com resíduos industriais ricos em cálcio e magnésio; a incorporação do carbonato de cálcio em materiais cimentícios de baixa emissão; e a realização de análises de ciclo de vida e avaliações tecnoeconômicas.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que os resultados experimentais do estudo-base permanecem cientificamente relevantes quando reinterpretados à luz dos avanços contemporâneos relacionados à captura, utilização e armazenamento de carbono, à mineralização do dióxido de carbono e ao desenvolvimento de materiais cimentícios de baixa emissão.

A análise integrada demonstrou que os mecanismos de captura química do CO₂ e de formação de carbonato de cálcio observados apresentam convergência com os princípios atualmente

reconhecidos para o armazenamento mineral permanente de carbono. Essa convergência reforça a consistência científica dos resultados e amplia sua contextualização frente aos desafios contemporâneos da mitigação das mudanças climáticas.

Do ponto de vista tecnológico, os resultados reforçam o potencial da mineralização do dióxido de carbono como estratégia de valorização do carbono capturado e como alternativa para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis, alinhados aos princípios da economia circular e às metas globais de descarbonização industrial.

Reconhece-se que a consolidação dessas aplicações dependerá de estudos adicionais envolvendo caracterização avançada, validação em escala piloto, análises de ciclo de vida e avaliações tecnoeconômicas. Ainda assim, as evidências reunidas demonstram que o estudo-base constitui contribuição científica consistente para a compreensão dos processos de captura mineral de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC; 2023. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. Lackner KS, Wendt CH, Butt DP, Joyce EL Jr, Sharp DH. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*. 1995;20(11):1153-1170. doi:10.1016/0360-5442(95)00071-N.

3. Huijgen WJJ, Comans RNJ. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: literature review. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands; 2003. Report ECN-C-03-016.
4. Bobicki ER, Liu Q, Xu Z, Zeng H. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Prog Energy Combust Sci*. 2012;38(2):302-320. doi:10.1016/j.pecs.2011.11.002.
5. Sanna A, Uibu M, Caramanna G, Kuusik R, Maroto-Valer MM. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chem Soc Rev*. 2014;43(23):8049-8080. doi:10.1039/C4CS00035H.
6. Chang R, Kim S, Lee S, Choi S, Kim M, Park Y. Calcium carbonate precipitation for CO₂ storage and utilization: a review of the carbonate crystallization and polymorphism. *Front Energy Res*. 2017;5:17. doi:10.3389/fenrg.2017.00017.
7. Power IM, Harrison AL, Dipple GM. Accelerating mineral carbonation using carbonic anhydrase. *Environ Sci Technol*. 2016;50(5):2610-2618. doi:10.1021/acs.est.5b04779.
8. Kelemen PB, Matter J. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2008;105(45):17295-17300. doi:10.1073/pnas.0805794105.
9. Xi F, Davis SJ, Ciais P, Crawford-Brown D, Guan D, Pade C, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nat Geosci*. 2016;9(12):880-883. doi:10.1038/ngeo2840.

10. Winnefeld F, Leemann A, German A, Lothenbach B. CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation. *Curr Opin Green Sustain Chem.* 2022;38:100672. doi:10.1016/j.cogsc.2022.100672.
11. AShraf W. Carbonation Of Cement-Based Materials: Challenges And Opportunities. *Constr Build Mater.* 2016;120:558-570. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.05.080
12. Zajac M, Skibsted J, Skocek J, Durdzinski P, Bullerjahn F, Ben Haha M. Phase assemblage and microstructure of cement paste subjected to enforced, wet carbonation. *Cem Concr Res.* 2020;130:105990. doi:10.1016/j.cemconres.2020.105990.
13. Scrivener KL, John VM, Gartner EM. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem Concr Res.* 2018;114:2-26. doi:10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
14. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Gaseous Carbon Waste Streams Utilization: Status and Research Needs. Washington (DC): National Academies Press; 2019. doi:10.17226/25232.
15. International Energy Agency. Cement. Paris: IEA; 2026 [cited 2026 jul 26]