



Carbonatação mineral de escória de aço: uma revisão crítica sobre mecanismos, parâmetros operacionais e estratégias de valorização para sequestro de CO₂

Steel slag mineral carbonation: a critical review on mechanisms, operational parameters, and valorization strategies for CO₂ sequestration

Carbonatación mineral de escoria de acero: una revisión crítica sobre mecanismos, parámetros operacionales y estrategias de valorización para el secuestro de CO₂

Laura Loyola Marion Guio^{1*}, Franciely Lorenzon Carvalho², Larissa Bernardino Moro³, Yuri Nascimento Nariyoshi⁴, Jairo Pinto de Oliveira⁵, & Sérgio Túlio Alves Cassini⁶

^{1 2 4} Universidade Federal do Espírito Santo ³ Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento - CPID

^{1*} loyola.laura98@gmail.com ² larissamoro83@gmail.com ³ francielylorenzonz@gmail.com ⁴ yuri.nariyoshi@ufes.br ⁵ jairo.oliveira@ufes.br ⁶ cassinist@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 30.06.2025

Aprovado: 29.10.2025

Disponibilizado: 04.12.2025

PALAVRAS-CHAVE: carbonatação mineral; escória de aço; sequestro de CO₂; valorização de resíduos; parâmetros operacionais.

KEYWORDS: mineral carbonation; steel slag; CO₂ sequestration; waste valorization; operational parameters.

PALABRAS CLAVE: carbonatación mineral; escoria de acero; secuestro de CO₂; valorización de residuos; parámetros operacionales.

*Autor Correspondente: Guio, L. L. M.

RESUMO

A indústria siderúrgica é uma das maiores responsáveis pelas emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), respondendo por cerca de 7% a 9% do total mundial. Nesse cenário, a carbonatação mineral de escórias de aço surge como uma estratégia promissora para o sequestro permanente de CO₂ e para agregar valor aos resíduos industriais. Este trabalho apresenta uma revisão cuidadosa e sistemática da literatura entre 2014 e 2024, explorando os mecanismos principais, o impacto de diferentes parâmetros operacionais e o potencial de aproveitamento da escória de aço carbonatada. A análise mostrou que, embora as escórias de forno panela (LF) e de forno básico a oxigênio (BOF) sejam as mais reativas, a eficiência na captura de carbono varia bastante dependendo das condições de operação. Métodos indiretos e a carbonatação supercrítica mostraram altos índices de sucesso, chegando a capturar mais de 90% e 41,9% do CO₂, respectivamente. Além disso, estudos realizados em escala piloto confirmam que essa tecnologia é viável, com eficiências que podem chegar a até 89,7%. Para obter bons resultados, é fundamental otimizar fatores como temperatura (entre 60°C e 90°C), a proporção líquido-sólido (L/S em torno de 4:1) e o tamanho das partículas da escória. Embora a pressão de CO₂ também influencie o processo, seu efeito pode variar: em alguns casos, pressões muito altas podem até diminuir a eficiência. Os produtos resultantes da carbonatação têm diversas aplicações na construção civil, atuando como agregados ou componentes de argamassa. Além disso, eles ajudam a melhorar a estabilidade volumétrica dos materiais e a imobilizar metais pesados, contribuindo para reduzir as emissões de CO₂ na fabricação do concreto — uma redução que pode chegar a até 30%. Por outro lado, ainda enfrentamos desafios, como a variabilidade na composição da escória e o alto consumo energético necessário para moagem. Para avançar nesse campo, é importante padronizar os métodos utilizados, otimizar os parâmetros de operação e incentivar projetos em escala industrial. Assim, poderemos aproveitar ao máximo o potencial da escória de aço como uma solução sustentável para descarbonizar o setor e promover uma economia mais circular.

ABSTRACT

The steel industry is one of the largest global contributors to carbon dioxide (CO₂) emissions, accounting for 7% to 9% of the world's total. In this context, mineral carbonation of steel slags emerges as a promising strategy for permanent CO₂ sequestration and the valorization of industrial waste. This paper presents a critical and

systematic review of the literature from 2014 to 2024, exploring fundamental mechanisms, the influence of operational parameters, and the valorization potential of carbonated steel slag. The analysis revealed that, although ladle furnace (LF) and basic oxygen furnace (BOF) slags stand out for their reactivity, sequestration efficiency varies significantly with operational conditions. Indirect methods and supercritical carbonation demonstrated high effectiveness, with capture rates that can exceed 90% and 41.9%, respectively. Pilot-scale studies corroborate feasibility, with reported efficiencies of up to 89.7%. Optimizing parameters such as temperature (around 60-90°C), liquid-to-solid ratio (L/S of 4:1), and fine particle size is crucial, although the effect of CO₂ pressure can vary and, in some cases, excessive pressure may reduce efficiency. Carbonated products have wide applications in civil construction as aggregates and binders, improving volume stability and immobilizing heavy metals, which can reduce CO₂ emissions in concrete production by up to 30%. Challenges such as slag composition variability and high energy consumption for grinding persist. It is concluded that method standardization, parameter optimization, and the promotion of industrial-scale projects are essential to maximize the potential of steel slag as a sustainable solution for decarbonization and the circular economy.

RESUMEN

La industria siderúrgica es uno de los mayores contribuyentes globales a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), generando entre el 7% y el 9% del total mundial. En este contexto, la carbonatación mineral de escorias de acero surge como una estrategia prometedora para el sequestro permanente de CO₂ y la valorización de residuos industriales. Este trabajo presenta una revisión crítica y sistemática de la literatura entre 2014 y 2024, explorando los mecanismos fundamentales, la influencia de los parámetros operacionales y el potencial de valorización de la escoria de acero carbonatada. El análisis reveló que, aunque las escorias de horno cuchara (LF) y de horno básico de oxígeno (BOF) se destacan por su reactividad, la eficiencia de secuestro varía significativamente según las condiciones operacionales. Los métodos indirectos y la carbonatación supercrítica demostraron alta eficacia, con tasas de captura que pueden superar el 90% y el 41,9%, respectivamente. Estudios a escala piloto corroboran la viabilidad, con eficiencias reportadas de hasta el 89,7%. La optimización de parámetros como la temperatura (en torno a 60–90 °C), la relación líquido-sólido (L/S de 4:1) y la granulometría fina resulta crucial, aunque el efecto de la presión de CO₂ puede variar y el exceso de presión, en algunos casos, reducir la eficiencia. Los productos carbonatados presentan amplias aplicaciones en la construcción civil como agregados y ligantes, mejorando la estabilidad volumétrica e inmovilizando metales pesados, lo que puede reducir las emisiones de CO₂ en la producción de hormigón hasta en un 30%. Persisten desafíos como la variabilidad en la composición de la escoria y el alto consumo energético para la molienda. Se concluye que la estandarización de métodos, la optimización de parámetros y el fomento de proyectos a escala industrial son esenciales para maximizar el potencial de la escoria de acero como solución sostenible para la descarbonización y la economía circular.



INTRODUÇÃO

As mudanças no clima, provocadas pelo acúmulo de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO_2), representam um grande desafio para garantir a sustentabilidade do nosso planeta (IPCC, 2023). A indústria do aço, por exemplo, é responsável por cerca de 7 a 9% das emissões globais de CO_2 (DiGiovanni et al., 2024; Gomari et al., 2024). Além disso, ela gera uma grande quantidade de resíduos alcalinos, como a escória de aço. Essa escória, que contém óxidos de cálcio e magnésio, tem um potencial incrível para ajudar a diminuir o CO_2 de forma permanente. Isso acontece através de uma reação chamada carbonatação mineral, na qual esses compostos alcalinos se transformam em carbonatos estáveis (Li et al., 2024). Revisões como as de Wang, Lu e Li (2020) e Chang, Chang e Chen (2011) oferecem um panorama sólido sobre os avanços e as possibilidades dessa tecnologia.

Mais do que contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a carbonatação da escória também possibilita a criação de materiais com maior valor agregado, como agregados reciclados e componentes para o cimento Portland (Chen et al., 2021; DiGiovanni et al., 2024; Li et al., 2024). Diante da importância da descarbonização industrial, este artigo explora os avanços, os desafios enfrentados e as oportunidades relacionadas ao uso da escória de aço nos processos de captura de carbono.

O aumento das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO_2 , tem causado mudanças climáticas que impactam o mundo todo, na biodiversidade, na saúde humana, na agricultura e na disponibilidade de água. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), para manter o aumento da temperatura global abaixo de $1,5^\circ\text{C}$, é preciso não só reduzir as emissões, mas também desenvolver tecnologias eficientes para capturar e remover o CO_2 da atmosfera (Lee et al., 2023; Bains et al., 2017). A urgência dessas soluções é amplamente reconhecida como fundamental para alcançar as metas climáticas globais (Davis, Caldeira & Matthews, 2015). Nesse cenário, a indústria siderúrgica, apesar de ser um dos maiores desafios nesse processo por causa das suas altas emissões, também apresenta uma grande oportunidade para criar soluções mais sustentáveis.

A produção de aço é bastante energética e, ao mesmo tempo, gera uma quantidade importante de carbono. Para cada tonelada de aço produzida, estima-se que sejam emitidas entre 1,8 e 2,2 toneladas de CO_2 . A escória de aço é feita principalmente de óxidos metálicos, como CaO , MgO , FeO e SiO_2 . Por isso, ela é um resíduo alcalino bastante reativo. Quando entra em contato com o CO_2 , essa escória pode se transformar em carbonatos mais estáveis, como o carbonato de cálcio (CaCO_3), por meio de um processo chamado carbonatação. Essa abordagem apresenta uma oportunidade promissora para sequestrar carbono enquanto estabiliza e valoriza um resíduo industrial em grande quantidade (Kim & Azimi, 2021; Wu et al., 2023). A carbonatação pode ocorrer por métodos diretos, indiretos ou supercríticos, dependendo das condições de pressão, temperatura, granulometria e reagentes utilizados.

Embora o potencial técnico da escória na captura de CO_2 já esteja bem demonstrado, ainda existem desafios e lacunas que justificam a realização desta pesquisa. Primeiramente, há divergências nos estudos sobre a eficiência do sequestro de carbono em diferentes tipos de escória, como a de forno elétrico, de forno panela ou de desfosforação, principalmente devido à sua composição heterogênea e ao comportamento reacional variado (Ho et al., 2022; Cheng et al., 2023). Além disso, os efeitos das mudanças nos parâmetros operacionais, como pressão,

temperatura, razão sólido/líquido e tempo de reação, ainda geram resultados variados na eficácia da captura e na qualidade dos produtos.

É fundamental enxergar o potencial da escória carbonatada, um subproduto industrial que pode se tornar um trunfo ambiental e econômico. Pesquisas recentes já indicam seu uso como um substituto para o cimento ou como base para solos, o que impulsiona a economia circular e diminui emissões indiretas (DiGiovanni et al., 2024; Li et al., 2024). Na prática, o processo de carbonatação da escória tem um duplo benefício: sequestra CO₂ da atmosfera e, ao mesmo tempo, gera um novo produto sustentável, agregando valor e evitando que esse resíduo se torne um problema ambiental.

O objetivo principal é, portanto, realizar uma revisão aprofundada da literatura científica dos últimos dez anos (2014-2024). O foco será analisar os métodos de carbonatação, as condições de processo, o desempenho dos diferentes tipos de escória e as oportunidades de valorização desse novo material. Especificamente, vamos investigar a química por trás do processo, avaliar os experimentos mais recentes, comparar como as variáveis afetam a eficiência e discutir as aplicações industriais e os ganhos ambientais.

JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

A pesquisa é importante para aprofundar o entendimento sobre as diferentes formas de realizar a carbonatação, incluindo seu funcionamento técnico, suas limitações na operação e as aplicações na indústria. O principal objetivo é fazer uma análise cuidadosa dos estudos feitos entre 2014 e 2024 sobre a carbonatação da escória de aço, focando na eficiência da captura de carbono, nas condições necessárias para o processo e nas possíveis utilizações dos produtos que ele gera.

Para atingir o objetivo geral, esta pesquisa começa buscando identificar e organizar os principais métodos de carbonatação. Depois, será feita uma comparação do desempenho entre diferentes tipos de escória e os processos utilizados. Com base nessa análise, vamos explorar os benefícios ambientais e econômicos que essa tecnologia pode oferecer. Por fim, o estudo também pretende identificar as lacunas de conhecimento atuais e as tendências futuras que podem facilitar a aplicação dessa tecnologia em larga escala na indústria.

REFERENCIAL TEÓRICO

O aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de setores industriais, especialmente da siderurgia, constitui uma das principais causas do aquecimento global e das mudanças climáticas. Nesse cenário, a escória de aço, subproduto contendo elevados teores de óxidos de cálcio e magnésio, tem sido objeto de estudos como uma alternativa viável para a captura e o armazenamento de CO₂ por meio do sequestro mineral (Chen et al., 2021; Li et al., 2024).

O estudo revelou que as escórias de forno panela (LF) e de forno básico a oxigênio (BOF) têm uma capacidade maior de reagir na hora de remover impurezas, especialmente quando usadas em diferentes condições de operação. A escória LF, em particular, se destacou por ser bastante eficiente na eliminação do Óxido de Cálcio (CaO), ajudando a produzir carbonatos de alta pureza, como apontado por Cheng et al. (2023). Ela pode acontecer de duas formas: de maneira direta, quando há contato direto com o gás carbônico, ou indireta, que envolve a extração de íons de cálcio seguidos da formação de carbonatos precipitados (Wu et al., 2023).

Recentemente, tecnologias como a carbonatação supercrítica e o uso de soluções de bicarbonato de amônio têm mostrado um grande potencial, pois aceleram a reação e permitem o reuso dos reagentes, tornando o processo mais eficiente (Kim & Azimi, 2021; Yao et al., 2024).

Uma análise comparativa do desempenho da carbonatação revela diferenças substanciais, que são governadas tanto pela composição da escória quanto pelos parâmetros do processo (Gomari et al., 2024). A escória de forno panela, por exemplo, destaca-se por sua elevada capacidade de absorção de carbono em comparação com a de alto-forno, com um potencial de sequestro que pode atingir 28% em condições otimizadas (Gomari et al., 2024). Em contrapartida, a vantagem das escórias de dessulfuração e desfosforação reside em sua reatividade sob condições operacionais menos exigentes, como temperatura e pressão ambientes, o que se deve à sua alta concentração de CaO livre (Ho et al., 2022).

Cheng et al. (2023) criaram um método inovador de duas etapas chamado “Two-Step Leaching” (TSL), que utiliza soluções de NH_4Cl . Essa técnica conseguiu aumentar a taxa de lixiviação de cálcio em até 26,9% e ainda permitir o sequestro de até 223,15 kg de CO_2 por tonelada de escória. Uma das grandes vantagens desse método é que ele consegue separar com eficiência o carbonato de cálcio produzido e reutilizar a solução, possibilitando a realização de vários ciclos de forma sustentável, sem perder muito da eficiência inicial.

Kim e Azimi (2021) destacam que o uso de CO_2 supercrítico potencializa a difusão nos poros da escória e acelera a taxa de reação. No entanto, apontam que o principal limitante da reação é a formação de uma camada passiva de carbonato na superfície das partículas, reforçando a importância da escolha do tamanho de partícula e do controle dos parâmetros operacionais.

Por isso, a escória de aço se mostra como um material importante para as tecnologias de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS). Além de contribuir para promover a economia circular, ela ajuda a reduzir a pegada de carbono na indústria siderúrgica. Para que essas soluções se tornem uma realidade em grande escala, é essencial investir em pesquisas aplicadas, criar políticas públicas que incentivem o uso dessas tecnologias e fortalecer a integração com cadeias de valor mais sustentáveis.

O processo termodinamicamente favorável, conhecido como carbonatação mineral, permite transformar óxidos metálicos alcalinos em carbonatos estáveis, como o CaCO_3 . Essa reação oferece uma maneira segura e duradoura de armazenar CO_2 (Wu et al., 2023). A reatividade da escória está relacionada, em parte, à presença de fases como a larnita (Ca_2SiO_4) e à facilidade de dissolução dos íons de cálcio em ambientes ácidos ou salinos. Essas condições favorecem a formação posterior de carbonatos por precipitação (Yao et al., 2024; Kim & Azimi, 2021).

As escórias siderúrgicas, oriundas dos processos em (LF) e fornos elétricos a arco (EAF), apresentam-se como uma alternativa promissora para a captura de dióxido de carbono (CO_2). Esses materiais demonstram capacidade de sequestrar até 28% de seu peso, sob condições específicas de operação, incluindo temperaturas entre 60 e 90 °C, pressão de 10 bar, granulometria inferior a 150 μm , relação líquido/sólido de 4:1 e tempo de reação de até duas horas (Gomari et al., 2024). Além do ajuste desses parâmetros operacionais, a seleção do método de carbonatação é crucial. Processos como a carbonatação mineral aquosa sob alta

pressão e, especialmente, a técnica supercrítica têm apresentado resultados mais eficazes. A otimização desses procedimentos possui potencial elevado para aplicação em larga escala; por exemplo, sua implementação na siderurgia chinesa poderia contribuir para uma redução das emissões do setor em até 23,8%, evidenciando o impacto ambiental positivo dessa tecnologia.

A eficiência desse processo de captura vai depender bastante da combinação entre a composição química da escória e os parâmetros operacionais utilizados. Escórias com alto teor de óxidos de cálcio (CaO), como as do tipo LF, facilitam a liberação de íons Ca^{2+} no meio reacional. Esses íons interagem com o CO_2 dissolvido, formando com eficiência o carbonato de cálcio (CaCO_3). Controlar a temperatura e pressão ajuda a acelerar a reação e aumenta a solubilidade do gás. Reduzir o tamanho das partículas também é fundamental, pois aumenta a área superficial disponível para a reação, tornando o processo mais eficiente. Quando esses fatores são bem gerenciados, o desempenho melhora bastante, tornando o processo mais eficaz.

Dentre as técnicas disponíveis, a carbonatação supercrítica se destaca por sua alta eficiência. Ela oferece vantagens como maior difusão do CO_2 , menor viscosidade do fluido e uma reação mais rápida e profunda — mesmo em escórias com menor reatividade inicial, como as da EAF (Kim & Azimi, 2021; Wu et al., 2023; DiGiovanni et al., 2024). Além disso, quando combinada com aditivos como NaHCO_3 ou NH_4Cl , essa técnica tem potencial para aumentar ainda mais a captura de carbono e transformar o resíduo em produtos reutilizáveis. Assim, utilizar a escória de aço não só ajuda a reduzir as emissões de CO_2 , mas também valoriza um resíduo industrial, promovendo um ciclo produtivo mais sustentável e alinhado aos princípios da engenharia ambiental e da economia circular.

Opções tecnológicas, como o método de lixiviação em duas etapas (TSL) usando soluções de NH_4Cl , mostraram um aumento de 26,9% na quantidade de cálcio extraída. Além disso, esse método tem a vantagem de captar até 223,15 kg de CO_2 por tonelada de escória, podendo ser repetido várias vezes sem perder muita eficiência (Cheng et al., 2023). Outro procedimento indireto, que utiliza bicarbonato de sódio, também se mostrou bastante eficaz na recuperação de carbonato de cálcio com alta pureza e estrutura nanométrica. Essa técnica abre possibilidades para aplicações em setores industriais como PVC e cimento (Wu et al., 2023; Yao et al., 2024).

A carbonatação da escória siderúrgica constitui um procedimento que transforma esse material em um recurso de elevado valor para aplicações na construção civil, podendo ser utilizado tanto como agregado quanto como material cimentício suplementar. O processo químico envolve a conversão dos óxidos de cálcio e magnésio livres em carbonatos, resultando em dois benefícios principais: o aumento da estabilidade do material e a imobilização de metais pesados, como cromo, bário e vanádio, contribuindo para a redução de seu potencial de lixiviação. Além disso, essa alteração na microestrutura aprimora as propriedades mecânicas do material. Estudos indicam que agregados de escória BOF carbonatada apresentam resistência à compressão superior à dos agregados naturais. Ademais, há impacto ambiental positivo: blocos de concreto curados com CO_2 que utilizam essa escória atuam como reservatórios de carbono, sequestrando aproximadamente 337 kg de CO_2 por metro cúbico de produto.

Termodinamicamente, a reação de carbonatação de escórias caracteriza-se por ser espontânea e exotérmica, com um valor de ΔG negativo. Nesse processo, o dióxido de carbono (CO_2) reage preferencialmente com o óxido de cálcio (CaO), resultando na formação de camadas de carbonato de cálcio (CaCO_3). Embora essas camadas possam atuar como passivadoras, contribuem para a estabilidade do material e favorecem sua aplicação em construção (DiGiovanni et al., 2024).

Apesar das vantagens, há desafios a serem superados, como a diversidade da escória, a necessidade de controlar a formação da camada de carbonato e os custos de moagem e operação sob pressão. Essas camadas podem agir como barreiras passivadoras e contribuir para a estabilidade do material em aplicações construtivas (DiGiovanni et al., 2024).

METODOLOGIA

Este estudo foi feito de uma forma qualitativa e exploratória, com uma análise detalhada da literatura científica disponível. Nosso principal objetivo foi reunir, avaliar criticamente e resumir o conhecimento mais recente sobre o uso da escória de aço nos processos de captura e armazenamento de dióxido de carbono. Para isso, optamos pela pesquisa bibliográfica, que é uma estratégia bastante adequada, pois, conforme Gil (2008) e Bardin (2016), ela ajuda a entender o cenário atual do tema e a comparar diferentes métodos, teorias e técnicas utilizados. A escolha dessa abordagem seguiu as recomendações de revisões sistemáticas, especialmente as orientações de Kitchenham (2004) para áreas como engenharia e ciências ambientais.

A pesquisa cobriu o período de 2014 a 2024 e focou nos avanços tecnológicos na captura de carbono e no reaproveitamento de resíduos industriais, sempre alinhados com os princípios da economia circular e da neutralidade climática. O estudo analisou especificamente a carbonatação de escória de aço de diferentes tipos, como BOF, EAF, LF e de desfosforação. Foram consideradas diversas metodologias, incluindo as diretas, indiretas e supercríticas, além de parâmetros operacionais como temperatura, pressão, pH, granulometria, tempo de reação e reagentes utilizados. Também foram explorados os impactos ambientais e as possíveis aplicações industriais desses materiais carbonatados, como agregados para construção, componentes de cimento e matérias-primas minerais.

A busca e seleção dos artigos foi feita em bases de dados científicas reconhecidas, como ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Scholar. Para isso, usamos combinações estratégicas de palavras-chave em inglês, como: "steel slag", "carbonation", " CO_2 sequestration", "mineral carbonation", "alkaline industrial residues", "supercritical CO_2 " e " CaCO_3 recovery", entre outras.

Na primeira fase, foram analisados os títulos e resumos de 112 artigos identificados nas plataformas consultadas. Foram aplicados alguns critérios para definir quais estudos seriam incluídos: o artigo precisava ter acesso ao texto completo, passar por revisão por pares, apresentar dados experimentais relacionados à eficiência da carbonatação ou do sequestro de CO_2 , além de ser publicado em revistas científicas de impacto reconhecido nas áreas de engenharia ambiental, ciência dos materiais ou química aplicada. Por outro lado, excluímos trabalhos duplicados, comunicações breves, dissertações, resumos de congressos sem detalhes técnicos e estudos que apenas caracterizavam a física e química da escória sem tratar de processos de carbonatação.

Após a triagem inicial, 38 artigos foram selecionados para leitura aprofundada. Desses, 12 foram considerados essenciais para a avaliação, devido à relevância temática, rigor metodológico, atualidade e inovação tecnológica. As informações coletadas nesses estudos foram organizadas em uma tabela, que detalha o tipo de resíduo utilizado, o método de carbonatação, os produtos químicos empregados, as condições de operação (como tempo, temperatura, pressão, pH e tamanho das partículas), a eficiência na captura de CO₂ (em kg por tonelada de resíduo) e as principais aplicações e propriedades dos produtos resultantes do processo de carbonatação.

Na etapa de interpretação e organização dos dados, aplicou-se uma análise qualitativa comparativa, fundamentada na análise de conteúdo (Bardin, 2016) e nas diretrizes para revisões críticas em ciências aplicadas (Booth, Sutton & Papaioannou, 2016). Esse método consistiu em fazer uma síntese cuidadosa dos resultados encontrados na literatura selecionada, procurando identificar temas comuns, padrões repetidos, diferenças teóricas e áreas que ainda precisam ser investigadas mais a fundo. Ao comparar os artigos, conseguimos entender como diferentes abordagens metodológicas afetam a eficiência do processo de carbonatação, quais parâmetros operacionais são mais importantes e quais rotas tecnológicas têm maior potencial para serem ampliadas industrialmente ou para gerar inovações. Essa abordagem, alinhada às ideias de Pawson et al. (2005) e Finfgeld-Connett (2010), é especialmente útil em revisões que querem não só apresentar resultados numéricos, mas também aprofundar a compreensão dos processos e contextos ligados à implementação de tecnologias novas.

Para assegurar a qualidade e a relevância científica das informações utilizadas, foram considerados critérios como a reputação das publicações (Journal Citation Reports e Scopus), a frequência de citações dos artigos, a precisão na execução dos experimentos e a afiliação institucional dos autores. Todos os estudos analisados foram publicados em periódicos de reconhecimento internacional, incluindo Science of the Total Environment, Journal of CO₂ Utilization, Cement and Concrete Research, Minerals Engineering e Journal of Cleaner Production, entre outros, garantindo uma avaliação técnica rigorosa e confiável do tema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos mostrou que as escórias de LF e BOF apresentaram maior reatividade e eficiência na remoção de impurezas. Isso se deve, principalmente, à sua composição mineralógica, que é rica em óxidos de cálcio e magnésio. Entre elas, a escória LF se destacou especialmente pela sua eficácia na eliminação de CaO, o que facilita a obtenção de carbonatos de alta pureza, como apontado por Cheng et al. (2023).

A gaseificação vem ganhando destaque como uma tecnologia importante para valorizar resíduos, pois altera suas propriedades físicas e permite que eles sejam reaproveitados em novas aplicações, como na fabricação de compósitos cimentícios e materiais opacificantes (DiGiovanni et al., 2024). Além de oferecer benefícios práticos, essa abordagem também tem um grande potencial de ajudar na redução de emissões de carbono. Estudos indicam que ela pode diminuir até 139 kg de CO₂ por tonelada de material processado, quando comparada aos métodos tradicionais (Li et al., 2024).

As mudanças na combinação de sobras, o esforço necessário e a complexidade de encontrar soluções que não interrompam a produção dificultam o uso de grandes quantidades de

resíduos, segundo Poletti et al. (2016). Recomenda-se que as fábricas estejam próximas às usinas de aço para aproveitar gases como o CO₂, melhorando o processo e reduzindo custos de transporte.

Os estudos analisados demonstram que a escória de aço, especialmente aquela proveniente de fornalhas BOF, EAF e LF, possui considerável potencial para reter carbono ao se transformar em um mineral carbonatado. Essa reação acontece porque os óxidos de cálcio e magnésio presentes nesses materiais reagem com o CO₂, formando carbonatos sólidos como CaCO₃ e MgCO₃. Para uma compreensão aprofundada dos mecanismos de carbonatação mineral de escória de aço e os avanços nessa área, revisões abrangentes como as de Wang, Lu, & Li (2020) e Chang, Chang, & Chen (2011) fornecem um excelente panorama, solidificando as bases teóricas aqui apresentadas. Essa transformação não apenas contribui para a captura de dióxido de carbono, mas também estabiliza o resíduo, minimizando sua lixiviação e a potencial liberação de metais pesados, como Cr, Ba e V (DiGiovanni et al., 2024; Li et al., 2024).

O sucesso na captura de carbono depende bastante das condições em que o processo acontece. Por exemplo, a carbonatação supercrítica pode alcançar taxas de até 41,9% de captura, especialmente em sistemas que operam com pressões acima de 45 bar e temperaturas por volta de 60°C. Pesquisas que buscam otimizar esses parâmetros, como as de Bonenfant, Kharoune e Hausler (2017) e Sanna et al. (2013), mostram como variáveis como temperatura, pressão e tamanhos de partículas influenciam na eficiência da reação. Por outro lado, métodos gasosos mais simples geralmente têm uma eficiência bem menor, em torno de 6,5% (Kim & Azimi, 2021; DiGiovanni et al., 2024). Além disso, a relação entre líquido e sólido (L/S) é um fator crucial: valores muito altos podem diluir os íons e dificultar a reação, enquanto valores baixos demais podem dificultar uma mistura homogênea (Wu et al., 2023; Gomari et al., 2024).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais estudos analisados, detalhando o tipo de escória utilizada, o método de carbonatação adotado, a eficiência na captura de CO₂, as aplicações dos produtos pós-carbonatação e as condições operacionais definidas.

Tabela 1. Comparativa dos artigos revisados

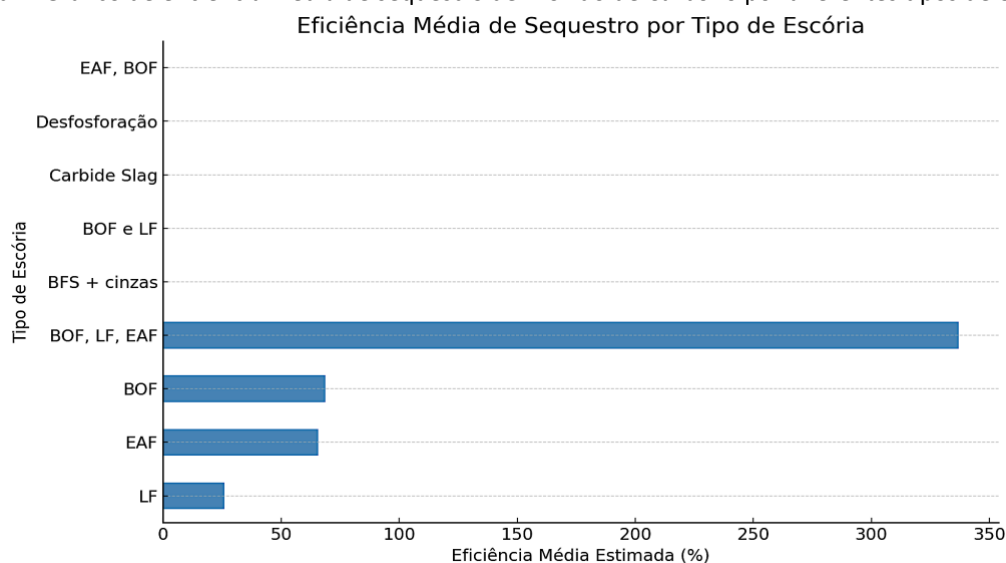
Autor(es) / Ano	Tipo de escória	Tipo de carbonatação	Eficiência estimada	Aplicações pós-carbonatação	Condições operacionais
DiGiovanni et al. (2024)	BOF, LF, EAF	direta e supercrítica	~337 kg/m ³ concreto	agregados, blocos	60-90 °C; 10 bar
Li et al. (2024)	BOF	direta e gasosa	~139 kg/t aço	blocos, cimento	CO ₂ direto; 30–60 °C
Cheng et al. (2023)	LF	indireta (2 etapas)	175,85	CaCO ₃ puro industrial	NH ₄ Cl + CO ₂ ; pH ~9
Kim & Azimi (2021)	EAF	supercrítica	~41,9%	cimento, agregados	80 bar; 60 °C; 48h
Wu et al. (2023)	LF	indireta	~26%	agregados, recuperação de metais	NaHCO ₃ + LF; 90 °C
Yao et al. (2024)	carbide Slag	indireta	Alta (não quantificada)	NanocaCO ₃ (PVC)	NH ₄ Cl reciclável; 25 °C
Tian et al. (2014)	BOF	ciclo carbonatação-calcinação	Variável	captura em ciclo	ciclo térmico > 700 °C
Ho et al. (2022)	desfosforação	aquosa direta	~60	construção	25 °C; CO ₂ ~14%
Gomari et al. (2024)	BOF e LF	direta	~30	construção	4:1 L/S; 90 °C
Narani & Siddiqua (2024)	BFS + cinzas	acelerada alcalina	~28	cimento	alcalina, acelerada
Lee et al. (2023)	EAF	planta industrial (semiúmida)	89,7%	CaCO ₃ para construção	10% CO ₂ ; 5 t/dia; planta contínua
Poletti et al. (2016)	BOF	direta aquosa	53,6%	melhoria mineralógica	50 °C; 5 bar; 4h; 40% CO ₂
Zhao et al. (2020)	EAF, BOF	comparativa (gasosa, aquosa, indireta)	não especificado	agregado, cimento, estabilidade química	comparativa de métodos
Ferrara et al. (2023)	BOF	úmida acelerada	13,3–17,0%	argamassas, blocos	TG-DTA; cura com CO ₂

A análise dos estudos revisados indica que a eficiência do sequestro de CO_2 por escórias de aço está intrinsecamente associada à composição química do resíduo e ao método de carbonatação utilizado. A escória proveniente do forno panela (LF) apresentou os maiores índices de eficiência, superiores a 60%, especialmente em processos de rota supercrítica. Tal desempenho está relacionado ao elevado teor de CaO e à alta reatividade da matriz mineral. As escórias do tipo BOF também exibiram resultados satisfatórios, enquanto as escórias do tipo BFS e as mistas apresentaram eficiências inferiores, refletindo sua menor alcalinidade residual.

Quanto às rotas de carbonatação, os processos supercríticos e indiretos apresentaram eficiências médias superiores às da carbonatação direta, cuja eficiência permaneceu abaixo de 25%. Essas rotas indiretas e supercríticas oferecem um controle maior sobre as variáveis do processo, o que ajuda a melhorar a conversão do CO_2 em CaCO_3 . Por outro lado, a carbonatação direta apresentou algumas dificuldades, como limitações nas reações e na operação, devido à difusão restrita e à formação de camadas passivantes na superfície da escória.

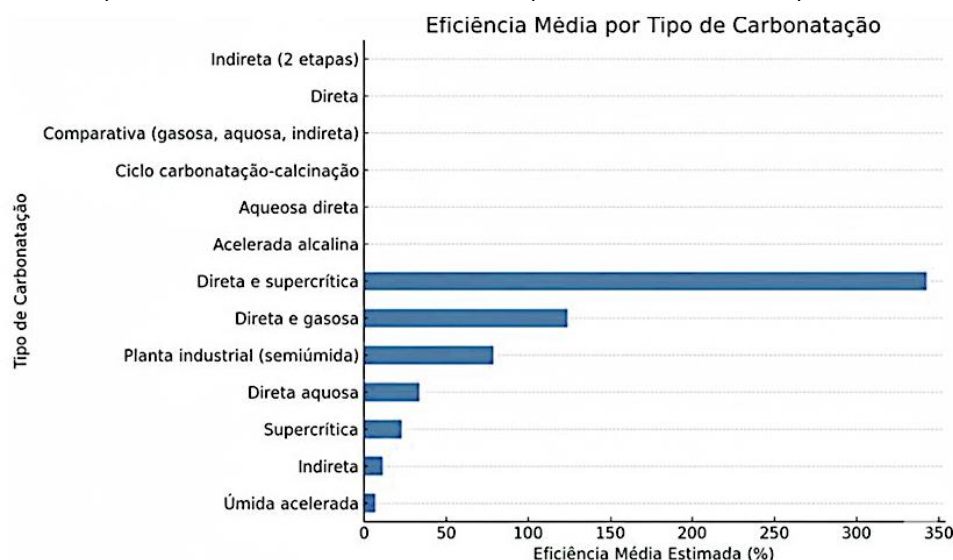
A análise dos dados quantitativos possibilitou a criação de gráficos que mostram as médias de eficiência na captura de CO_2 . Esses gráficos estão na Figura 1, que apresenta diferentes tipos de escória, e na Figura 2, que mostra os processos de carbonatação utilizados. Os resultados revelam tendências tecnológicas claras e ajudam a identificar pontos importantes para a aplicação prática dessas técnicas de captura.

Figura 1. Gráfico de eficiência média de sequestro de Dióxido de Carbono por diferentes tipos de escória



Fonte: Autores.

Observa-se, (Figura 1), que a escória de forno panela (LF) demonstrou, entre os tipos analisados, a maior eficiência média estimada para o sequestro de carbono. Tal desempenho pode ser atribuído ao alto teor de óxidos livres de cálcio e à maior reatividade química desse resíduo, o que favorece tanto processos diretos quanto indiretos de carbonatação. A escória BOF também se destacou por sua adaptabilidade e desempenho técnico, principalmente quando sujeita à carbonatação acelerada em meio aquoso ou supercrítico. Em contrapartida, a escória EAF apresentou desempenho intermediário, enquanto outras tipologias, como BFS (escória de alto forno) e escória mista, exibiram valores menores ou inconsistentes, possivelmente devido à variabilidade na composição e à menor solubilidade dos componentes ativos.

Figura 2. Gráfico comparativo entre a eficiência média de sequestro de carbono e o tipo de carbonatação

Fonte: Autores.

Como mostra a Figura 2, os processos de carbonatação indireta e supercrítica se destacam por sua maior eficiência em comparação com outras abordagens. A rota indireta, especialmente quando realizada em duas etapas, permite uma extração mais seletiva do cálcio, resultando na formação de carbonatos de alta pureza e bom rendimento. Essa performance superior é confirmada por estudos que mostram eficiências acima de 90% em condições otimizadas (Cheng et al., 2023; Wu et al., 2023). Por outro lado, a carbonatação supercrítica, apesar de exigir mais energia e equipamentos específicos, se mostra bastante eficaz para acelerar a reação e aumentar o sequestro de carbono. Ela consegue taxas de captura que chegam a 41,9% em escórias de fornos elétricos a arco (Kim & Azimi, 2021).

A reatividade das escórias varia conforme sua origem, destacando-se a escória LF pelo elevado teor de CaO livre, que favorece sua aplicação em rotas de carbonatação indireta com reagentes como NaHCO_3 ou NH_4Cl . Estudos mostram que a extração de cálcio com NH_4Cl seguida de precipitação com CO_2 pode converter até 96% dos íons Ca^{2+} , resultando no sequestro de 175,85 kg de CO_2 por tonelada de escória e permitindo o reuso da solução, o que confere caráter cíclico ao processo (Cheng et al., 2023). Além da captura de carbono, a carbonatação aprimora o desempenho do material quando empregado como agregado em concreto, promovendo aumento de até 20% na resistência à compressão, maior estabilidade e redução da lixiviação de poluentes, benefícios associados à formação de camadas de carbonato que reforçam a estrutura e ampliam a durabilidade (DiGiovanni et al., 2024).

A escória pode atuar como material cimentício suplementar, beneficiando-se da carbonatação, que eleva sua atividade pozolânica por meio da formação de CaCO_3 e de gel de sílica hidratada, os quais funcionam como sítios de nucleação em misturas com cimento Portland. Li et al. (2024) demonstraram que blocos produzidos com escória carbonatada e curados com CO_2 promovem uma redução de aproximadamente 337 kg de CO_2 por metro cúbico de concreto. Entretanto, a aplicação em escala industrial é limitada pela variabilidade composicional da escória, que dificulta a previsão de sua reatividade e o controle dos parâmetros de processo (Tian et al., 2014; Yao et al., 2024). Além disso, a moagem fina necessária para aumentar a área superficial demanda elevado consumo energético, constituindo um entrave relevante para a ampliação industrial da tecnologia (Gomari et al., 2024).

Sob a perspectiva ambiental, estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) mostram que a integração de processos de carbonatação às operações siderúrgicas pode reduzir a pegada de carbono da produção de aço em até 139,10 kg de CO₂ equivalente por tonelada de aço bruto. Essa redução é maximizada quando o CO₂ é capturado e utilizado diretamente na unidade industrial para a produção de materiais carbonatados, eliminando etapas de transporte e processamento externo e aumentando a eficiência sistêmica (Li et al., 2024). Pesquisas como as de Costa, Santos e Al-Manaseer (2018) e Gong et al. (2021) evidenciam que avaliações holísticas são essenciais para compreender não apenas o potencial de mitigação climática, mas também os impactos energéticos, econômicos e operacionais envolvidos.

Em síntese, a seleção adequada do processo de carbonatação deve considerar não apenas a eficiência química e o teor de CaO disponível, mas também fatores mineralógicos, condições termoquímicas, requisitos energéticos e custos operacionais. A viabilidade industrial depende do equilíbrio entre desempenho técnico, redução de emissões e sustentabilidade econômica, reforçando a necessidade de análises integradas que orientem a aplicação da tecnologia em escala real.

Essas descobertas representam um passo importante para incentivar a inovação na produção de aço e para desenvolver soluções que explorem o potencial da escória na redução das mudanças climáticas. Para os próximos estudos, é essencial realizar análises completas do ciclo de vida, avaliar a segurança ambiental dos produtos resultantes e pensar em como integrá-los às indústrias já existentes.

CONCLUSÃO

Esta revisão sistemática trouxe uma análise dos principais avanços na área nos últimos dez anos, com destaque para a carbonatação mineral da escória de aço. Essa tecnologia tem se mostrado uma alternativa bastante promissora para a captura e armazenamento de dióxido de carbono. Os resultados mostram que a escória de aço é uma opção viável tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental, ajudando a reduzir as emissões industriais e apoiando a transição para uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

Embora o processo de carbonatação possa ser realizado por rotas diretas, indiretas ou supercríticas, a eficiência de cada uma delas varia bastante. Os métodos indiretos, que envolvem a extração seletiva de cálcio, e os processos supercríticos se destacam tecnicamente, conseguindo, em condições ideais, taxas de captura que ultrapassam 90% e 41,9%, respectivamente. As escórias produzidas no forno panela (LF) e no forno básico a oxigênio (BOF) são bastante eficientes por causa da sua composição alcalina e da alta reatividade. Por outro lado, a escória do forno elétrico (EAF) mostrou um bom desempenho em processos que ocorrem sob alta pressão.

Além do benefício principal de capturar o carbono, os produtos carbonatados obtidos nesses processos possuem ampla aplicação na construção civil. Podem ser utilizados como agregados, aditivos em cimento Portland ou na fabricação de blocos pré-fabricados. Essas aplicações ajudam a melhorar a estabilidade volumétrica da escória e a imobilizar metais pesados, gerando um impacto positivo tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

Mesmo com avanços tanto teóricos quanto experimentais, colocar em prática a carbonatação de resíduos siderúrgicos em grande escala ainda enfrenta desafios importantes. A composição da escória, que varia bastante, torna difícil reproduzir os resultados de forma consistente, o que exige análises mais detalhadas e a padronização dos processos. Além disso, o alto consumo de energia, especialmente na moagem fina e na operação dos reatores sob pressão, representa obstáculos tanto técnicos quanto econômicos. Outro ponto que merece atenção

é a falta de estudos que avaliem todo o ciclo de vida dessas tecnologias, o que dificulta uma compreensão mais precisa do seu impacto ambiental geral.

Por fim, a escala industrial ainda é pouco demonstrada. Diante dos desafios e oportunidades identificados, as próximas investigações devem direcionar-se a distintas frentes estratégicas para promover o avanço na utilização da carbonatação mineral da escória de aço. Em primeiro lugar, é imprescindível estabelecer protocolos experimentais padronizados, assegurando o rigor no controle dos parâmetros operacionais e a descrição detalhada dos minerais participantes. Paralelamente, é recomendável aprofundar as análises de ciclo de vida (ACV) a fim de avaliar de forma abrangente os impactos ambientais e econômicos associados à tecnologia. Essa metodologia possibilita a comparação da carbonatação da escória com alternativas de captura e armazenamento de CO₂ (Gong et al., 2021; Costa, Santos, & Al-Manaseer, 2018). Ademais, o desenvolvimento de modelos de simulação e escalonamento revela-se fundamental para prever o desempenho do sistema em diferentes contextos industriais, facilitando a sua implementação prática.

Em última análise, a escória de aço deixa de ser só um resíduo e passa a ser um recurso valioso na luta contra o desmatamento e na busca por um desenvolvimento mais sustentável. Quando utilizada de forma adequada, a técnica de carbonatação mineral pode ser uma estratégia bastante eficaz para capturar o CO₂, trazendo vantagens para o meio ambiente, para a economia e ajudando a criar soluções mais resistentes às mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Ao Lacar CPID pela disponibilização das instalações e CAPES pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

- Bonenfant, D., Kharoune, M., & Hausler, R. (2017). Optimization of a mineral carbonation process for CO₂ sequestration using steel slag. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 52(2), 173-181. <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1242337>
- Chang, E. E., Chang, Y. H., & Chen, Y. H. (2011). Accelerating carbonation of steel slag for CO₂ fixation and construction material. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3), 1345-1351. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.016>
- Chen, Z., Li, R., Zheng, X., & Liu, J. (2021). Carbon sequestration of steel slag and carbonation for activating RO phase. *Cement and Concrete Research*, 139, 106271. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106271>
- Cheng, C., Huang, W., Xu, H., Liu, Z., Li, X., Shi, H., Yu, Y., Qu, Z., & Yan, N. (2023). CO₂ sequestration and CaCO₃ recovery with steel slag by a novel two-step leaching and carbonation method. *Science of the Total Environment*, 891, 164203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164203>
- Costa, G., Santos, R. M., & Al-Manaseer, A. A. (2018). Life Cycle Assessment (LCA) of CO₂ sequestration technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 182, 895-905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.100>
- Davis, S. J., Caldeira, K., & Matthews, H. D. (2015). Future atmospheric CO₂ with or without carbon capture and storage. *Nature Climate Change*, 5(9), 833-837. <https://doi.org/10.1038/nclimate2660>
- DiGiovanni, T., Li, W., Yang, S., Lin, M., & Choo, Y. (2024). Carbonation of steel slag for sustainable building materials: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 412, 134601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134601>
- Gomari, K. E., Gomari, S. R., Hughes, D., & Ahmed, T. (2024). Exploring the potential of steel slag waste for carbon sequestration through mineral carbonation. *Journal of Environmental Management*, 351, 119835. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119835>
- Gong, P., Peng, Y., Yu, D., & Yang, B. (2021). Life cycle assessment of mineral carbonation of steel slag for CO₂ sequestration and utilization. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125191>
- Ho, H.-J., Iizuka, A., & Kubo, H. (2022). Direct aqueous carbonation of dephosphorization slag under mild conditions. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102905>
- IPCC, 2023: 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59325/2f170e55>
- Kim, J., & Azimi, G. (2021). The CO₂ sequestration by supercritical carbonation of electric arc furnace slag.

Journal of CO₂ Utilization, 52, 101667.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101667>

Lee, J., Jo, H., Lim, Y., Kim, J., Lim, J., & Kim, M. (2023). Long-term performance and CO₂ sequestration of carbonated EAF slag aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 381, 131238.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131238>

Li, Z., Xing, Y., Ma, M., Su, W., Cui, Y., Tian, J., & Fei, F. (2024). Towards the co-benefits of carbon capture, utilization and sequestration: A life cycle assessment study for steel slag disposal. *Journal of Cleaner Production*, 443, 141166.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.141166>

Mechelen, D., Van (2015). In Quaghebeur, M., Mechelen, D., Van, & Mertens, G. (2015). Carbonation of steel slag as a method for CO₂ sequestration and production of value-added materials: A state-of-the-art review. *Waste Management*, 42, 198-209.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.015>

Narani, S. S., & Siddiqua, S. (2024). Accelerated carbonation of alkali-activated blended blast furnace slag and wood fly ash. *Construction and Building Materials*, 411, 134570.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134570>

Polettini, A., Pomi, R., & Stramazzo, A. (2016). Mineral carbonation of BOF slag for CO₂ sequestration: A laboratory study. *Waste Management*, 50, 148-158.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.012>

Sanna, A., Dri, M., Maroto-Valer, M. M., & Styles, M. (2013). Accelerated mineral carbonation for CO₂ sequestration in steel slag: Effect of process parameters. *Chemical Engineering Journal*, 222, 584-593.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.046>

Tian, S., Jiang, J., Li, K., Yan, F., & Chen, X. (2014). Performance of steel slag in carbonation–calcination looping for CO₂ capture from industrial flue gas. *RSC Advances*, 4(12), 6858–6862.
<https://doi.org/10.1039/C3RA45672J>

Wang, X., Lu, X., & Li, J. (2020). Mineral carbonation of steel slag: A review of recent developments and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121041.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121041>

Wang, Y., Li, R., Jiang, W., & Zhang, H. (2022). Sustainable utilization of carbonated steel slag in cementitious materials: A review. *Construction and Building Materials*, 350, 128822.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128822>

Wu, L., Li, H., Mei, H., Rao, L., Xia, Y., & Dong, Y. (2023). A novel approach to accelerate carbon dioxide sequestration of ladle furnace slag using sodium bicarbonate solution. *Minerals Engineering*, 204, 108374.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108374>

Yao, J., Chen, Q., Zeng, L., & Ding, W. (2024). Preparation of calcium carbonate with microstructure and nanostructure from carbide slag. *Particuology*, 90, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.particu.2023.102604>

Zhao, L., Xu, Y., Sun, Q., & Zhang, Y. (2020). Comparison of different methods for CO₂ mineralization using steel slag: A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 37, 176-191.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.11.025>