CARBONATAÇÃO DE ESCÓRIAS DE ACIARIA PARA CAPTURA DE CO_2: UMA REVISÃO DO PROCESSO E APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO

Steel slag carbonation for CO_2 capture: a review of the process and applications in construction

Lucas Rhuan Prudente
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | lucas.prudente@aluno.ufop.edu.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

Resumo

O artigo explora o uso de escórias de aciaria na captura de CO_2 através da carbonatação, uma abordagem sustentável para gerenciamento de resíduos industriais e redução das emissões de gases de efeito estufa. A carbonatação das escórias envolve reações químicas entre seus óxidos e o CO_2, formando carbonatos estáveis, como o carbonato de cálcio, que melhora suas propriedades. O estudo analisa os fatores que influenciam o processo de carbonatação, como temperatura, pressão, tempo de reação e tamanho das partículas, e como essas variáveis afetam a eficiência do sequestro de carbono. A escória carbonatada pode ser utilizada como substituto do cimento Portland e/ou agregados convencionais, melhorando a resistência, durabilidade e segurança ambiental das matrizes cimentícias. O artigo destaca o potencial das escórias como solução sustentável na indústria da construção, contribuindo para a redução da pegada de carbono e a promoção de materiais mais ecológicos.

Palavras-chave: Escória de Aciaria; Carbonatação; Captura de CO_2; Mecanismo de Carbonatação.

ABSTRACT

The article explores using of steel slag in CO_2 capture through carbonation, a sustainable approach to managing industrial waste and reducing greenhouse gas emissions. Slag carbonatation involves chemical reactions between its oxides and CO_2, forming stable carbonates, such as calcium carbonate, which enhance its properties. The study analyzes the factors influencing the carbonation process, such as temperature, pressure, reaction time, and particle size, and how these variables affect the efficiency of carbon sequestration. Carbonated slag can be used as a substitute for Portland cement and conventional aggregates, improving the strength, durability, and environmental safety of cement-based composites. The article highlights the potential of slag as a sustainable solution in the construction industry, contributing to reducing the carbon footprint and promoting more eco-friendly materials.

Keywords: Steel Slag; Carbonation; CO_2 Capture; Carbonation mechanism.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de escórias de aciaria na produção de agregados calcários é uma estratégia sustentável para reduzir resíduos industriais, capturando CO_2 e contribuindo para o combate às mudanças climáticas. A indústria siderúrgica gera grandes quantidades de escórias, com uma produção global anual superior a 400 milhões de toneladas, muitas vezes descartadas inadequadamente. A carbonatação dessas escórias pode ajudar a gerenciar esses resíduos, sequestrando carbono e melhorando suas propriedades para aplicações na construção civil (Liu *et al.*, 2023; Meng *et al.*, 2024).

Com a crescente preocupação sobre o aquecimento global, impulsionado pela alta emissão de CO_2, o Acordo de Paris visa limitar o aumento da temperatura terrestre, exigindo redução das emissões. Dentro dessa estratégia, a Agenda de 2030 propõe a incorporação de tecnologias e práticas sustentáveis para alcançar as metas climáticas, como a utilização de resíduos industriais na construção civil. A escória, um subproduto da produção de ferro-gusa, contém óxidos e pode ser utilizada em diversos processos, como produção de cimento Portland e agregados. A carbonatação das escórias, que envolve a reação com CO_2, permite seu aproveitamento e a redução de emissões poluentes (Zhang *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023).

A aplicação da escória de aciaria na construção civil alinha-se aos princípios da economia circular, ao transformar um passivo ambiental em insumo técnico de valor agregado, promovendo o fechamento de ciclos produtivos (EUROPEAN COMMISSION, 2020). Desta forma, este artigo revisa a literatura sobre o uso de escória de aciaria para captura de CO_2, explorando as interações materiais-processos e destacando áreas para melhorias e futuras pesquisas.

2 METODOLOGIA

A revisão foi baseada em uma busca nas bases de dados *Scopus, Web of Science e ScienceDirect*, utilizando as palavras-chave: *escória de aciaria, captura de CO_2 e carbonatação mineral*. Foram considerados artigos publicados entre 2020 e 2025 para garantir a inclusão de estudos recentes.

Os critérios de inclusão foram: (i) estudos sobre a aplicação de escória de aciaria em processos de captura de CO_2; (ii) artigos com análises experimentais ou modelagens de carbonatação mineral da escória. Foram excluídos: (i) estudos sobre outros tipos de escórias (exemplo: alto-forno); (ii) artigos sobre o uso da escória sem relação com a captura de CO_2.

Os artigos selecionados foram analisados quanto às suas metodologias, resultados e contribuições, com foco nas propriedades físico-químicas da escória, mecanismos de carbonatação e eficiência de captura de CO_2.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 TIPOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA

A escória de aciaria, subproduto da fabricação de aço, é classificada em três tipos principais: forno de oxigênio básico (BOF), forno elétrico a arco (EAF) e forno de panela (LF). Sua composição inclui principalmente óxidos como CaO, MgO, MnO, SiO_2, Al_2O_3 e FeO, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Principal composição química da escória do aço.

Escória	CaO (%)	MgO (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MnO (%)
BOFS	37,5	4,7	19,2	5,4	17,4	5,0
BOFS	42,43	9,15	12	3,03	26,74	2,85
EAFS	37,47	5,82	17,44	3,18	27,29	2,79
EAFS	53,98	7,26	24,94	4,89	1,23	-
LFS	45,7	6,2	9,5	29,8	0,8	-
LFS	48,6	6,6	9,3	29,6	1,8	0,9

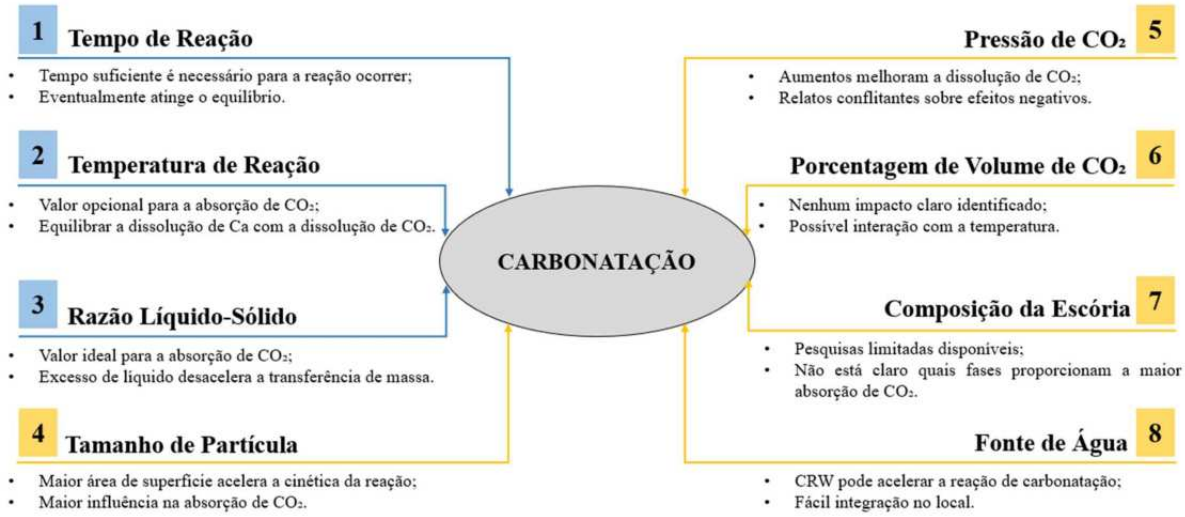
Fonte: Adaptado de Huang *et al*. 2023.

A escória de BOF tem alta alcalinidade, baixa resistência à compressão e alta densidade devido ao FeO, podendo reduzir a trabalhabilidade do concreto e causar expansão volumétrica devido ao f-CaO. A escória EAF, com menor alcalinidade e maior proporção de fase RO, é menos adequada para materiais cimentícios, mas útil em aplicações como bases de estradas. A escória LF, com maior conteúdo de CaO e MgO, varia dependendo do tipo de aço e não é recomendada em altas proporções como substituto do cimento (Huang *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024; Li *et al.,* 2023).

3.2 PARÂMETROS DO PROCESSO

O processo de carbonatação é influenciado por fatores como tempo, temperatura, pressão, concentração de CO_2, tamanho das partículas e composição da escória, que afetam a cinética e as propriedades dos materiais gerados, como ilustrado na Figura 1. A carbonatação nas partículas de escória de aciaria é inicialmente controlada pela reação entre Ca^{2+} e CO_2, seguida pela difusão do CO_2 na camada carbonatada (Biava, G. *et al*., 2024). Existem métodos diretos (seco e úmido) e indiretos, em que o CO_2 é imerso em uma suspensão de escória após a extração de metais alcalinos (Ferrara *et al*., 2023).

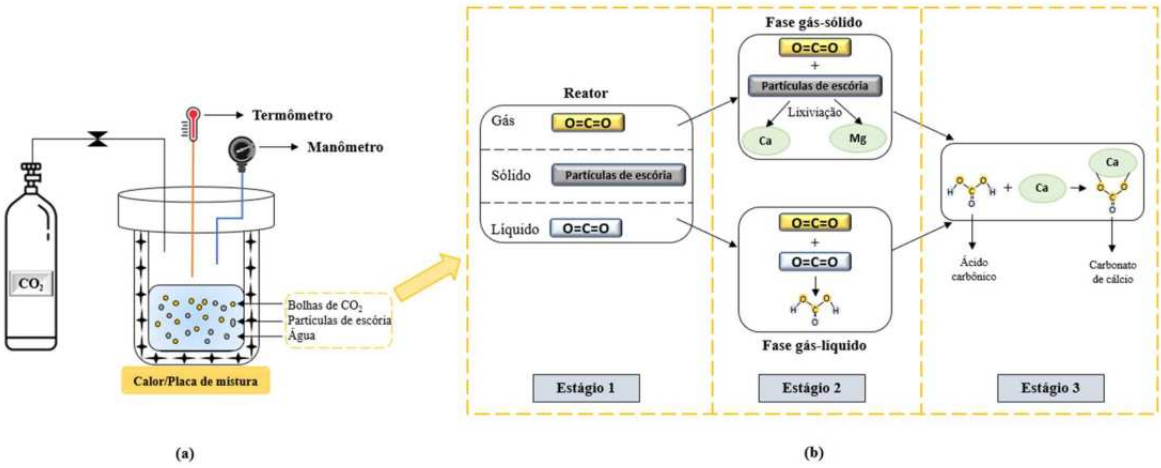
Figura 1: Parâmetros da reação de carbonatação enfatizando seu efeito no processo geral com parâmetros críticos em azul.



3.2.1 MECANISMOS QUÍMICOS

Os mecanismos de captura de CO_2 pela escória de aciaria envolvem a carbonatação dos óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO), presentes na escória, que reagem com o CO_2 para formar carbonatos estáveis, como carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o carbonato de magnésio ($MgCO_3$). Esses processos ocorrem naturalmente, mas podem ser acelerados em condições controladas de pressão e temperatura, especialmente quando o CO_2 é introduzido na sua forma líquida ou supercrítica, conforme ilustrado na Figura 2 (Wang *et al.* 2022).

Figura 2: Diagramas esquemáticos da configuração de carbonatação (a) e mecanismo (b).



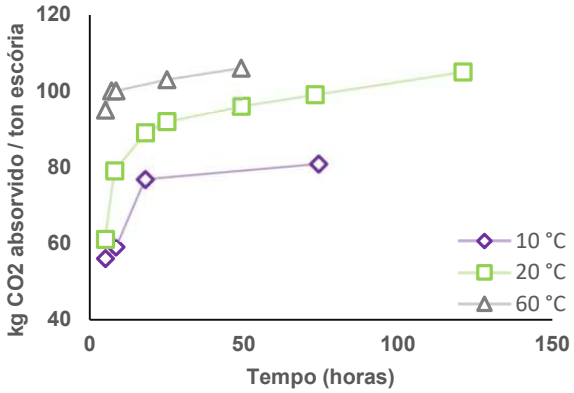
Fonte: Adaptado de Gomari *et al*. 2023.

A presença de água é fundamental para acelerar o processo de carbonatação, uma vez que os óxidos presentes na escória podem ser hidratados, formando hidróxidos, que são mais reativos, como $Ca(OH)_2$, que subsequentemente reage com CO_2 para formar $CaCO_3$. Além disso, a água dissolve o CO_2, formando ácido carbônico (H_2CO_3), que reage mais rapidamente com os óxidos (Lee *et al*. 2023).

3.2.2 Tempo de Reação

Mesmo após a carbonatação inicial, parte da escória mantém atividade pozolânica residual, sobretudo em função da presença de MgO e sílica não carbonatada, o que contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo de cura (Wang *et al*. 2022). O tempo de reação influencia a taxa de carbonatação, que é inicialmente alta e depois diminui até atingir um platô, como ilustrado na Figura 3. A explicação mais comum é a formação de uma camada de produto ao redor da partícula de escória, que se torna mais espessa conforme a reação avança, dificultando a difusão de CO_2 para o núcleo não reagido (Nielsen *et al*., 2020). Outra hipótese é que o pH da solução diminui durante a reação devido ao consumo de alcalinidade e à liberação de H+ com a dissolução do CO_2. Em ambos os casos, é essencial otimizar o tempo de reação para maximizar a carbonatação e reduzir a quantidade de material não reagido (Digiovanni *et al*., 2024).

Figura 3: Absorção de CO_2 em função da temperatura e duração da carbonatação.

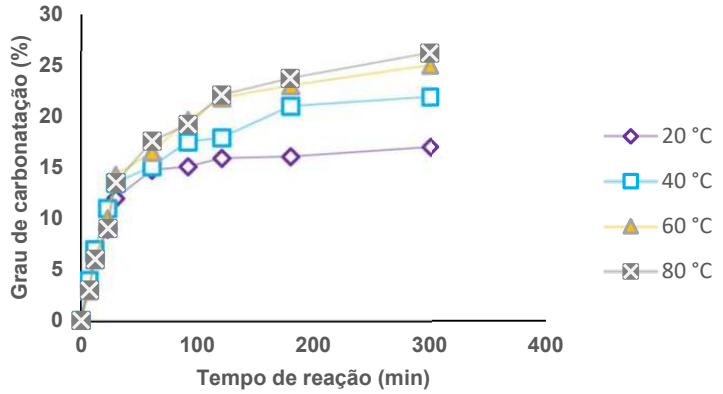


Fonte: Adaptado de Huang *et al*., 2024.

3.2.3 Temperatura de Reação

A temperatura de reação é essencial para a carbonatação da escória, pois influencia tanto a dissolução do CO_2 quanto a lixiviação de íons de cálcio. Embora o aumento da temperatura acelere a lixiviação, ele reduz a solubilidade do CO_2, o que pode ter efeitos positivos e negativos. Estudos indicam que a temperatura ideal para maximizar o sequestro de CO_2 é cerca de 60 ºC, representado na Figura 4, embora isso dependa de fatores como pressão e propriedades da escória. Temperaturas mais altas são necessárias para a carbonatação gasosa-sólida, mas temperaturas acima de 600 ºC podem prejudicar a reação (Wang *et al*. 2024).

Figura 4: Gráfico mostrando que a absorção de CO_2 diminui após 60 °C.



Fonte: Adaptado de Huang *et al*., 2024.

3.2.4 PRESSÃO E CONCENTRAÇÃO DE CO_2

Concentrações elevadas de CO_2 (acima de 50% de CO_2 em volume) aceleram a reação inicial, mas concentrações mais baixas (menos de 20%) podem, com tempo maior, alcançar ou até superar a conversão das concentrações mais altas. A resistência à compressão está correlacionada à capacidade de captura de CO_2, permitindo otimizar as propriedades da escória. A 0,5 MPa de CO_2, a distribuição de calcita nas partículas é uniforme, enquanto pressões superiores a 1 MPa aceleram a dissolução e promovem uma distribuição mais homogênea da calcita. No entanto, pressões superiores a 3 MPa podem obstruir os poros e diminuir a resistência. A interação entre temperatura e pressão acelera a conversão de Ca na fase inicial, mas na fase final, a solubilidade do CO_2 limita a reação. Alternar as pressões de CO_2, variando entre 0,5 MPa e 2 MPa, pode melhorar a absorção e a resistência em comparação ao uso de pressão constante (Nielsen *et al*., 2020; Luo *et al*. 2021).

3.2.5 RAZÃO LÍQUIDO SÓLIDO

A relação líquido-sólido (L/S) influencia diretamente a taxa e a extensão da carbonatação: uma relação mais alta, geralmente acima de 20, aumenta a taxa de reação pela maior disponibilidade de água. No entanto, uma relação excessivamente alta, superior a 30, pode limitar a concentração de CO_2 dissolvido e a lixiviação de íons Ca, prejudicando a extensão da carbonatação. Por outro lado, uma L/S abaixo de 5 resulta em uma reação mais lenta. A escolha da L/S ideal, que geralmente varia entre 10 e 20, é fundamental para otimizar a carbonatação, equilibrando esses efeitos. Fatores como temperatura também interagem com a L/S, e o valor ideal pode depender de outros parâmetros do processo, sendo idealmente determinado por estudos experimentais (Digiovanni *et al*. 2024; Zhang *et al*. 2024).

3.2.6 TAMANHO DE PARTÍCULA DA ESCÓRIA

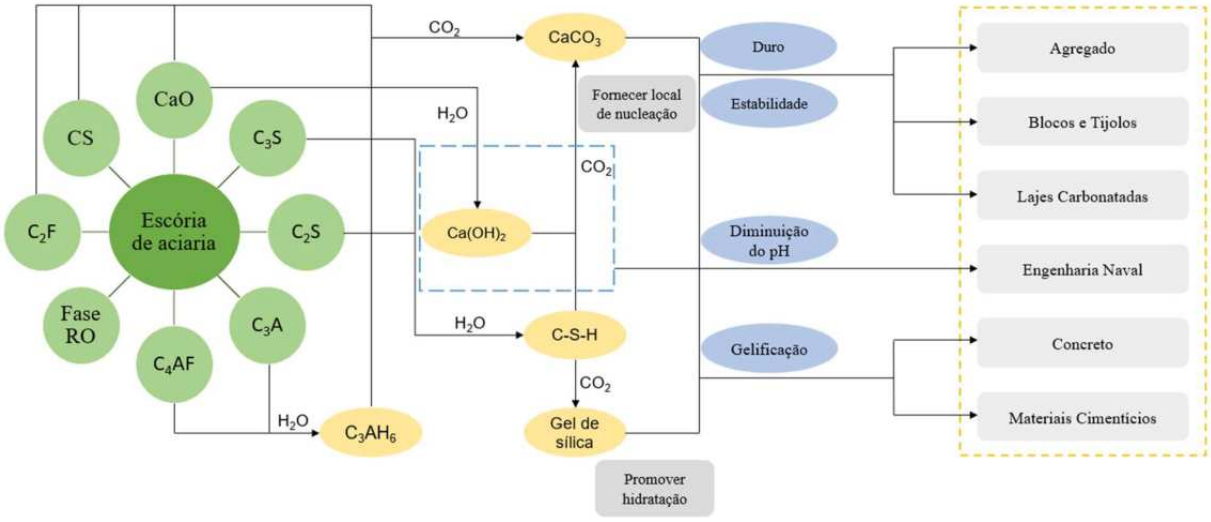
O tamanho das partículas de escória afeta a hidratação e a carbonatação, com partículas menores aumentando a taxa de absorção de CO_2 devido à maior área de superfície, o que resulta em maior carbonatação e resistência. As partículas finas também preenchem vazios e rachaduras, melhorando a densidade e a estrutura do material cimentício. A distribuição do tamanho das partículas influencia a difusão de CO_2 e a taxa de reação. Embora partículas menores apresentem maior atividade de hidratação, uma área de superfície excessiva pode causar aglomeração. A granulometria ideal, geralmente na faixa de 5 a 50 µm, otimiza a reatividade, a difusão de CO_2 e o desempenho mecânico dos produtos à base de escória de aço. Além disso, o preenchimento de poros por carbonatos contribui para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia, reduzindo a porosidade total e aumentando a durabilidade frente a agentes agressivos, como cloretos e sulfatos (Wang *et al*. 2024; Luo *et al*. 2021).

3.3 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DO CIMENTO

Segundo Zhang, X. *et al*. (2024), a indústria de cimento é responsável por 7,4% das emissões globais de CO_2, e para mitigar esse impacto, materiais cimentícios suplementares (MCSs), como a escória de aciaria, são usados como substitutos parciais ao clínquer. A escória de aciaria carbonatada oferece vantagens, como maior resistência mecânica e estabilidade, devido à formação de $CaCO_3$, que melhora a microestrutura e a atividade de hidratação, além de eliminar compostos expansivos como f-CaO e f-MgO. Essa escória também pode substituir os agregados nas matrizes cimentícias, melhorando a resistência à compressão, reduzindo a retração autógena e aumentando a durabilidade e a umidade interna em comparação aos agregados naturais. Além disso, a carbonatação diminui a lixiviação de metais pesados, aumentando a segurança ambiental. Em estabilização de solos, a escória melhora a resistência à erosão, aumenta a densidade do solo e neutraliza solos ácidos, enquanto contribui para a captura de CO_2 e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Wang *et al*., 2024). Algumas dessas aplicações estão ilustradas na Figura 5.

Em termos de integração em processos industriais, a escória carbonatada pode ser incorporada diretamente na produção de cimentos compostos ou ser utilizada na formulação de concretos com baixa relação água/cimento, aproveitando as características de preenchimento de poros e reatividade secundária. Há potencial de integrar unidades de carbonatação acelerada junto às plantas de cimento, utilizando o próprio CO_2 dos fornos como reagente no tratamento prévio da escória, criando um modelo de produção circular com sequestro interno de carbono (Li *et al.*, 2024).

Figura 5: Diagrama esquemático dos componentes minerais e produtos de carbonatação da escória de aciaria.



Fonte: Adaptado de Yuan *et al*. 2024.

4 CONCLUSÃO

A carbonatação das escórias de aciaria apresenta uma abordagem sustentável para a gestão de resíduos industriais e a captura de CO_2. Ao reagir com o CO_2, as escórias se transformam em materiais com propriedades aprimoradas, tornando-se adequadas para aplicações na construção civil, como substituto ao cimento Portland, agregados convencionais e na estabilização de solos. A otimização de parâmetros como temperatura, pressão e tamanho das partículas é fundamental para maximizar o sequestro de carbono e melhorar o desempenho dos materiais. Essa estratégia contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promove a sustentabilidade.

Futuras pesquisas devem se concentrar em escalonamento do processo, integração com tecnologias CCS, avaliação de ciclo de vida (ACV) e desempenho a longo prazo em estruturas reais, visando uma aplicação comercial ampla e viável.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (RECICLOS-CNPq), à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio institucional, técnico e financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho e à formação dos pesquisadores envolvidos.

REFERÊNCIAS

BIAVA, G.; DEPERO, L.E.; BONTEMPI, E. Accelerated Carbonation of Steel Slag and Their Valorisation in Cement Products: A Review. **Spanish Journal of Soil Science**. Apr. 2024. https://doi.org/10.3389/sjss.2024.12908.

DIGIOVANNI, C.; HISSEINE, O.A.; AWOLAYO, A.N. Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways. **Journal of CO_2 Utilization.** Mar. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102736.

European Commission. (2020). A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: European Commission.

FERRARA, G.; BELLI, A.; KEULEN, A.; TULLIANI, J.M.; PALMERO, P. Testing procedures for CO 2 uptake assessment of accelerated carbonation products: Experimental application on basic oxygen furnace steel slag samples. **Construction and Building Materials**. Set. 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133384.

HUANG, X.; ZHANG, J.; ZHANG, L. Accelerated carbonation of steel slag: A review of methods, mechanisms. **Construction and Building Materials**. Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134603.

GOMARI, K.E.; GOMARI, S.R.; HUGHES, D.; AHMED, T. Exploring the potential of steel slag waste for carbon sequestration through mineral carbonation: A comparative study of blast-furnace slag and ladle slag. **Journal of Environmental Management.** Dec. 2023. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119835.

LEE, H.; KIM, T.W.; KIM, S.H.; LIN, Y.W.; LIN, C.T.; CHOI, Y.; CHOI, C. Carbon Dioxide Capture and Product Characteristics Using Steel Slag in a Mineral Carbonation Plant. **Processes**. May 2023. https://doi.org/10.3390/pr11061676.

LI, L.; CHEN, T. GAO, X.; YANG, W. New insights into the effects of different CO2 mineralization conditions on steel slag as supplemental cementitious material. **Journal of Building Engineering**. Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108566.

LI, N.; UNLUER, C. Development of high-volume steel slag as cementitious material by ethylenediamine tetraacetic acid induced accelerated carbonation. **Powder Technology**. Aug. 2023. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118899.

LIU, J.; ZENG, C.; LI, Z.; LIU, G.; ZHANG. W.; XIE, G.; XING, F. Carbonation of steel slag at low CO2 concentrations: Novel biochar cold-bonded steel slag artificial aggregates. **Science of the Total Environment.** Aug. 2023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166065.

LUO, Z.; WANG, Y.; YANG, G.; YE, L.; ZHANG, W.; LIU, Z.; MU, Y. Effect of curing temperature on carbonation behavior of steel slag compacts. Construction and Building Materials. 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123369.

MENG, Y.; ZHU, X.; ZHANG, Y.; SU, Y.; QU, F.; POON, C.S.; YAN, J.; TSANG, D.C.W. Valorizing inherent resources from waste streams for in-situ CO2 capture and sequestration in the steel industry. **Journal of Cleaner Production**. May 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142486.

NIELSEN, P.; BOONE, M.A.; HORCKMANS, L.; SNELLINGS, R.; QUAGHEBEUR, M. Accelerated carbonation of steel slag monoliths at low CO2 pressure microstructure and strength development. **Journal of CO_2 Utilization**. Nov. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.10.022.

YUAN, J.; CHANG, J.; DU, X. A review of research advance on accelerated carbonation of steel slag: Property improvement, utilization, environmental and economic benefits. **Sustainable Chemistry and Pharmacy.** Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101819.

WANG, Y.; LIU, J.; HU, X.; CHANG, J.; ZHANG, T.; SHI, C. Utilization of accelerated carbonation to enhance the application of steel slag: A review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials. Dec. 2022. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials.** https://doi.org/10.1080/21650373.2022.2154287.

WANG, S.; WHANG, M.; LIU, F.; SONG, Q.; DENG, Y.; YE, W.; NI, J.; SI, X.; WANG, C. A Review on the Carbonation of Steel Slag: Properties, Mechanism, and Application. **Materials.** Apr. 2024. https://doi.org/10.3390/ma17092066.

WANG, Z.; XU, S.; ZHENG, S.; DUAN, H.; CHEN, D.; LONG, M.; LI, Y. Accelerated carbonation and stabilization of BOF slag: data fitting relationship between particle size and CO2 sequestration. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials.** Jan. 2024. https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2301665.

ZHANG, Y.; ZHAN, G.; HUANG, Z.; XING, L. YING, Y.; CHEN, Z. Performance and mechanisms of alkaline solid waste in CO2 mineralization and utilization. **Waste Management.** Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.047.

ZHANG, X.; ZHAO, J.; LIU, Y.; LI, J. Use of steel slag as carbonation material: A review of carbonation methods and evaluation, environmental factors and carbon conversion process. **Journal of CO_2 Utilization**. Oct. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102947.