CHAPTER XIII

CCUS TECHNOLOGY IN CONCRETE AS A SUSTAINABLE STRATEGY FOR DECARBONIZING THE CEMENT INDUSTRY

TECNOLOGIA CCUS NO CONCRETO COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL PARA A DESCARBONIZAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO

DOI: 10.51859/amplla.sset.3225-13

Maria Clara Moreira dos Santos [1]
Gabriel Rodrigues de Negreiros [2]

[1] Graduanda do curso de Bacharelado em Química. Universidade Federal do Piauí – UFPI. ORCID: 0009-0007-3153-5111.
[2] Mestrando em Química Inorgânica. Programa de Pós-Graduação em Química - Universidade Federal do Piauí – UFPI. ORCID: 0009-0008-7218-6816.

ABSTRACT

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technology stands out as one of the promising strategies for the decarbonization of hard-to-abate industrial sectors, such as the cement industry. Portland cement, the basis of concrete, is the second most consumed material in the world and accounts for about 8% of global carbon dioxide (CO2) emissions, mainly due to the thermal decomposition of limestone during clinker formation. In Brazil, the world's seventh-largest producer, the cement industry is essential to the economy and construction sector, but faces challenges related to sustainability and reducing its carbon footprint. In this context, CCUS emerges as an alternative capable of capturing up to 90% of industrial emissions and reusing CO2 through the carbonation process, forming CaCO3 in fresh concrete. This incorporation not only reduces emissions but also improves the material's mechanical strength and durability, promoting productive efficiency and a circular economy. Studies indicate that the large-scale application of this technology could contribute up to 18% of the global reduction in industrial emissions by 2060, and it is already being used in countries such as the United States and Canada. In Brazil, its adoption meets the climate targets of the Paris Agreement, the SDGs, and the 2024 NDC. However, its consolidation depends on technical advances, transport infrastructure, economic viability, and incentive policies. Thus, investments in innovation, carbon credits, and specific regulations will be fundamental to boost this technology and strengthen the role of the cement sector in the transition to a low-carbon economy.

Keywords: Carbonation. Decarbonization. Portland Cement. Sustainability.

RESUMO

A Tecnologia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) destaca-se como uma das estratégias promissoras para a descarbonização de setores industriais de difícil abatimento, como a indústria de cimento. O cimento Portland, base do concreto, é o segundo material mais consumido do mundo e responde por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO2), principalmente pela decomposição térmica do calcário na formação do clínquer. No Brasil, sétimo maior produtor mundial, a indústria cimenteira é essencial à economia e à construção civil, mas enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade e à redução da pegada de carbono. Nesse contexto, a CCUS surge como uma alternativa capaz de capturar até 90% das emissões industriais e reutilizar o CO2 com o processo de

carbonatação, formando CaCO3 no concreto fresco. Essa incorporação não apenas reduz as emissões, mas também melhora a resistência mecânica e a durabilidade do material, promovendo eficiência produtiva e economia circular. Estudos indicam que a aplicação em larga escala dessa tecnologia pode contribuir com até 18% da redução global de emissões industriais até 2060, já sendo empregada em países como Estados Unidos e Canadá. No Brasil, sua adoção atende às metas climáticas do Acordo de Paris, ODS e da NDC de 2024. Entretanto, sua consolidação depende de avanços técnicos, infraestrutura de transporte, viabilidade econômica e políticas de incentivo. Assim, investimentos em inovação, créditos de carbono e regulamentações específicas serão fundamentais para impulsionar essa tecnologia e fortalecer o papel do setor cimenteiro na transição para uma economia de baixo carbono.

Palavras-chave: Carbonatação. Cimento Portland. Descarbonização. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland, base para a produção do concreto, é o segundo material mais consumido do mundo (Dutra *et al*., 2022). Sua cadeia produtiva é responsável por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), um dos principais gases de efeito estufa (GEE). O Brasil ocupa a 7ª posição mundial na produção de cimento, segundo dados do World Population Review (2023), com 64,7 milhões de toneladas produzidas em 2024 (SNIC, 2025), o que evidencia a importância econômica do setor e, ao mesmo tempo, seus desafios ambientais relacionados à sustentabilidade e à redução das emissões de CO_2 (OGCI, 2024).

Diante desse cenário, a Tecnologia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) tem se destacado como alternativa promissora para a descarbonização de setores industriais de difícil abatimento, como o cimenteiro. Essa tecnologia permite capturar o CO_2 gerado na decomposição térmica do calcário durante a produção do clínquer, transportá-lo e armazená-lo temporariamente de forma segura, podendo ainda ser reutilizado como matéria-prima na produção do cimento (Cassel *et al*., 2024; CNI, 2024). Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), a CCUS pode contribuir com até 18% da redução global das emissões industriais até 2060 (OGCI, 2024).

No contexto brasileiro, a adoção dessa tecnologia é vista como estratégica para manter a competitividade industrial frente às novas políticas climáticas e aos mecanismos de precificação de carbono (CNI, 2024). Entre suas etapas estão a captura do CO_2 dos gases de pós-combustão por meio de membranas seletivas, que apresentam alta eficiência e baixo consumo energético (Miranda *et al*., 2018), o armazenamento temporário em tanques criogênicos a cerca de -30 °C e a injeção do

CO_2 nas betoneiras, resultando na produção do chamado cimento carbonatado (CarbonCure Technologies Inc., 2023; Nitrotec, 2020).

Durante a produção, o CO_2 reage com compostos como o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e o hidrato de silicato de cálcio (C–S–H), formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Essa mineralização reduz a porosidade da matriz cimentícia, aumenta sua resistência mecânica e durabilidade, e diminui o pH devido ao consumo de íons OH^- (Fu *et al*., 2024; Oliveira, 2024).

Dessa forma, este estudo busca avaliar a viabilidade da aplicação da tecnologia CCUS na indústria cimenteira, investigando os mecanismos de incorporação permanente do CO_2 no produto final, seus efeitos estruturais e ambientais e o potencial de melhoria na eficiência energética do processo. Espera-se, com isso, contribuir para uma futura implementação em escala industrial, alinhada às metas da nova NDC brasileira de 2024 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo um modelo de produção mais limpo e integrado.

2 INDUSTRIA DO CIMENTO

2.1 Processo produtivo

A fabricação do cimento envolve etapas que combinam a extração, o beneficiamento e a transformação de minerais não metálicos, tendo o clínquer como principal produto intermediário. Ele é obtido pela queima de uma mistura de calcário e argila, além de aditivos como areia, bauxita e minério de ferro, em fornos a cerca de 1.450 °C. Após a trituração e homogeneização desses materiais, forma-se a farinha crua, que segue para o pré-aquecedor e o pré-calcinador, atingindo aproximadamente 800 °C, onde se inicia a calcinação. Em seguida, o material passa pelo forno rotativo, cuja chama pode alcançar 1.500 °C, promovendo a fusão parcial e a formação do clínquer (Barker *et al*., 2009; CNI; ABCP; SNIC, 2012).

Depois de resfriado, o clínquer é moído com gesso e adições minerais, como escória de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário, originando o cimento Portland. O processo pode ocorrer por quatro métodos: via úmida, semiúmida, semisseca e seca, sendo a via seca a mais eficiente, pois reduz o consumo energético, o uso de combustíveis e as emissões de CO_2 (CNI; ABCP; SNIC, 2012).

2.2 *Brasil e o Acordo de Paris: Avanços, Lacunas e Soluções para as Emissões de CO2*

As emissões de gases poluentes, especialmente o CO_2, têm sido foco de acordos internacionais, estudos técnicos e relatórios que visam reduzir seus impactos ambientais. O Acordo de Paris (2015), estabelecido sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), é um dos principais marcos, com o objetivo de limitar o aquecimento global a menos de 2°C relacionado aos níveis pré-industriais, preferencialmente 1,5°C. As Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) que foram apresentadas pelos países signatários no mesmo ano, ainda estão abaixo do nível necessário para cumprir o principal objetivo já supracitado, resultando em uma lacuna de 47 Gt equivalente até 2050 (Höhne *et al*., 2021).

O governo brasileiro em sua NDC comprometeu-se em combater as mudanças climáticas, reduzindo as emissões dos GEE em 37% até 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% até 2030, em comparação com os níveis registrados em 2005 (Brasil, 2017; IEMA, 2022). Contudo, as emissões nacionais aumentaram 21,4% entre 2015 e 2021, saltando de 1.446 milhões de toneladas para 1.756 milhões de toneladas de CO_2 equivalente, valor acima das metas previstas (IEMA, 2022). O desmatamento, sobretudo na Amazônia, e as emissões industriais são os principais fatores desse aumento (EBC, 2023; Cassel *et al*., 2024).

Em 2024, o país atualizou sua NDC, estabelecendo uma metas de redução das emissões de 59% a 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005. Essa nova meta visa alinhar o país ao objetivo global de limitar o aquecimento a 1,5°C, conforme estabelecido no Acordo de Paris. Isso também equivale a alcançar entre 850 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de CO_2 equivalente em termos absolutos (Brasil, 2024).

Nesse contexto, a indústria cimenteira no Brasil pode ter um papel importante na redução das emissões de CO_2. Reduzir essas emissões de forma imediata é essencial, pois o CO_2 permanece ativo na atmosfera por séculos. Cada tonelada evitada hoje representa um impacto climático mais significativo do que reduções futuras, reforçando a urgência de ações mitigadoras nos setores intensivos em carbono, como o da construção civil (CarbonCure Technologies Inc., 2023).

2.3 *Tendências Globais e Futuras Demandas por cimento*

O concreto de cimento Portland é considerado a espinha dorsal de diversas construções da esfera civil ao longo do tempo e para a infraestrutura contemporânea,

sendo indispensável em obras civis, edifícios, estradas e barragens. Sua versatilidade, durabilidade e baixo custo o tornaram o material de construção mais utilizado no planeta, atrás apenas da água em volume de consumo (Dutra *et al*., 2022; Helene e Andrade, 2010). No entanto, apesar de seu papel central no desenvolvimento urbano e econômico, o concreto também representa um grande desafio ambiental, especialmente devido a forma como se chega a matéria final, a qual libera um dos maiores vilões do GEE, o dióxido de carbono (Caldas *et al*., 2024).

Conforme dados divulgados pelo SNIC (2024), o consumo de cimento no Brasil alcançou 62,8 milhões de toneladas em 2022, com a região Sudeste liderando esse volume. O país conta atualmente com 93 fábricas espalhadas pelo território nacional, cuja capacidade total de produção anual é estimada em 94 milhões de toneladas (SNIC, 2024). Dessa produção, na Região Nordeste o Ceará entra-se em 3º lugar no quesito de consumo, ficando atrás apenas da Bahia e Pernambuco (SNIC, 2024).

2.4 Estratégias para a descarbonização da Indústria Cimenteira

De acordo com relatório da SNIC em 2022, as indústrias devem buscar não apenas alternativas para diminuir as emissões de CO_2 nos processos de produção de clínquer e cimento, mas também pretender incorporar estratégias de descarbonização em outras etapas, como nos concretos, nos sistemas construtivos, na eletrificação, na recarbonatação, processo em que estruturas de concreto absorvem CO_2, além de explorar soluções inovadoras e disruptivas, como a captura e uso de carbono.

O uso do CO_2 capturado pode reagir com compostos de cálcio presentes nos resíduos da produção de cimento, formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) por carbonatação. Esse processo aumenta a resistência mecânica do concreto e promove o sequestro permanente de carbono, reduzindo emissões e diminuindo a extração de matérias-primas virgens, como calcário e argila. Assim, fomenta-se a economia circular e a sustentabilidade do setor cimenteiro (CarbonCure Technologies Inc., 2023; Oliveira, 2024).

A aplicação dessa tecnologia está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). Ao integrar práticas de economia circular e tecnologias de captura e

reutilização de carbono, a proposta contribui para tornar o setor da construção civil inovador, eficiente e ambientalmente responsável (ONU, 2025).

3 TECNOLOGIA DE CAPTURA, USO E ARMAZENAMENTO DE CO_2

As tecnologias de Captura, Uso e Armazenamento de Carbono (em inglês, CCUS de *Carbon Capture, Usage and Storag*) englobam um conjunto de estratégias voltadas à redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, especialmente aquelas oriundas de setores industriais intensivos em carbono, como a indústria do cimento. Além de capturar as emissões na fonte, essa tecnologia também permite a remoção direta do CO_2 presente na atmosfera (CNI, 2024).

Essas tecnologias tem o potencial de capturar até 90% do CO_2 emitido, independente da fonte de origem. Após a captura, o gás pode ser armazenado de forma segura em reservatórios geológicos ou reutilizado em processos industriais, como na produção de cimento e fertilizantes, contribuindo diretamente para as metas climáticas globais (CNI, 2024; IBP, 2024).

O relatório “Net Zero by 2050” da Agência Internacional de Energia (AIE), aponta a CCUS como tecnologia-chave para eliminar emissões líquidas de carbono até 2050, podendo ser um marco histórico no cumprimento das metas globais de energia e clima (IEA, 2021). Com isso, os projetos usando essa tecnologia são diversos, sendo que em 2020, a soma de projetos relacionados chegaram a capturar 75 Mtpa, valor que subiu para 111 Mtpa em 2021, um aumento de 48%. O Brasil respondeu por cerca de 7 Mtpa, equivalendo a 19% da capacidade operacional global que era 36,6 Mtpa (IBP, 2022).

O funcionamento da CCUS envolve quatro etapas principais: captura, transporte, armazenamento e utilização do CO_2 (CLDP, 2024). A captura pode ocorrer por pré-combustão, com adaptação dos fornos para hidrogênio; pós-combustão, mais comum e facilmente implementável; ou oxi-combustão, com queima em oxigênio puro, que alcança até 99% de captura, embora com maior custo operacional. Ainda é necessário que o CO_2 seja separado nessa etapa de outros gases que saem nesse mesmo processo (SNIC e ABCP, 2019; IBP, 2024).

A segunda etapa é o transporte desse gás para ser armazenado, o qual é comprimido e enviado por dutos ou navios em forma líquida sob alta pressão. A terceira etapa é o proveniente do processo de armazenamento, que pode ser permanente, em reservatórios geológico, ou temporário, em tanques superficiais com

possibilidade de reuso. Por fim, na etapa de utilização o CO_2 pode ser aplicado em diferentes setores, no cimento (via carbonatação), na indústria alimentícia, ou na recuperação de hidrocarbonetos pela indústria petrolífera (IBP, 2024).

4 PROCESSO QUÍMICO DE CARBONATAÇÃO DO CO_2

O CO_2 pode ser armazenado no concreto, sem perda de resistência ou durabilidade. Além disso, esse processo pode atingir uma eficiência de até 45% no sequestro do CO_2 (Fu *et al*., 2024). Em média, esse método de utilização de carbono é bastante eficiente devido reduzir a pegada de carbono do concreto (CarbonCure Technologies Inc, 2023).

Uma das técnicas de sequestro mineral é da categoria *ex situ*. Esse tipo de mineralização é o processo pelo qual o CO_2 capturado da pós-combustão reage com materiais ricos em cálcio e/ou magnésio, sendo o cálcio um dos elementos mais presentes como matéria-prima proveniente do calcário na preparação do cimento, ocorrendo em um processo industrial separado de etapa única (Huijgen e Comans, 2003; Kelemen *et al*., 2019).

Essa Mineralização pode ocorrer com a massa do cimento ainda fresca, devido possuir vantagens como: possibilidade de carbonatar um volume maior de concreto por meio de injeções de CO_2 durante a mistura e a possibilidade de incorporar bicos de injeção de CO_2 com relativa facilidade em processos industriais (CarbonCure Technologies Inc, 2023).

De maneira experimental Fu *et al*. (2024) realizou experimentos em uma suspensão de cimento diluído em vez da massa do cimento fresco, obtendo uma pasta de cimento com as propriedades inalteradas e desejadas, ou seja, não perdeu as suas qualidades. Depois, foi adicionado os agregados para formar o concreto. Durante essa etapa, o $CaCO_3$ é precipitado (forma cristais sólidos). Foram realizados testes com espectroscopia de raios-X (DRX) que mostraram que o carbonato de cálcio formado está nas formas cristalinas calcita e aragonita, formas estáveis e naturais do $CaCO_3$. Além disso, foram identificados outros compostos típicos do cimento hidratado: C_3S, C_2S, etringita, C–S–H (hidrato de silicato de cálcio), hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e portlandita.

Além disso, como Fu *et al*. (2024) afirmou que a quantidade de carbonato de cálcio formada depende diretamente da quantidade de CO_2 injetada, quanto mais CO_2, mais precipitação de $CaCO_3$ ocorre, aumentando a fixação do gás e também a

resistência do material. Essa abordagem pode ser uma rota mais eficiente e energeticamente barata para capturar CO_2 em escala industrial, além de fortalecer o material final. As reações químicas que explicam esse processo são:

Reação de hidratação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), a qual o cimento Portland contém principalmente tricalcium silicate (C_3S) e dicalcium silicate (C_2S), que reagem com água (hidratação) formando C-S-H (hidrato de silicato de cálcio), principal responsável pela resistência mecânica do concreto e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) (Fu *et al*., 2024).

Reação do C_3S: $2\,(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca(OH)_2$ (1)

Reação C_3S: $2\,(2CaO{\cdot}SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + Ca(OH)_2$ (2)

Esses subprodutos podem reagir com CO_2. Na reação 3, o $Ca(OH)_2$ será carbonatado, a qual o $CaCO_3$ formado tende ser a calcita (um polimorfo estável do carbonato de cálcio). Nas demais reações 4, 5 e 6, além do $Ca(OH)_2$ que tende ser aragonita (outro polimorfo do carbonato de cálcio, menos estável que a calcita), o gel C–S–H também reage com o CO_2 formando carbonato de cálcio e sílica hidratada. Essas reações ocorrem em diferentes proporções (Fu *et al*., 2024).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (3)$$

$$3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + 2CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O \quad (4)$$

$$3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 2CO_2 \rightarrow 2CaCO_3 + CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O \quad (5)$$

$$3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + 2SiO_2{\cdot}3H_2O \quad (6)$$

Partindo dessa perspectiva, embora a carbonatação *ex situ* do concreto apresente alto potencial de redução de emissões, a sua implementação em larga escala depende de fatores como a disponibilidade de infraestrutura industrial para captura e injeção de CO_2, o custo dos equipamentos e a logística de transporte do gás. Além disso, a pureza do CO_2 e as condições de pressão e temperatura são determinantes para a eficiência da mineralização (Fu *et al*., 2024; Oliveira, 2024).

Portanto, duas vantagens principais caracterizam as abordagens de carbonatação fresca em comparação com as endurecidas: (1) a possibilidade de carbonatar um volume maior de concreto por meio de injeções de CO_2 durante a mistura e (2) a possibilidade de incorporar bicos de injeção de CO_2 com relativa facilidade em processos industriais (Fu *et al*., 2024). Para viabilizar essa tecnologia, é necessário o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a adoção de

soluções de baixo carbono na construção civil, por meio de créditos de carbono, certificações verdes e investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

5 REGULAMENTAÇÃO DAS TECNOLOGIAS CCUS NO BRASIL

A regulamentação da tecnologia CCUS no Brasil encontra-se em fase de estruturação e implementação, após avanços recentes no arcabouço legal e regulatório. Até poucos anos, a atividade não possuía legislação específica, limitando-se a discussões acadêmicas e projetos de lei em tramitação no Congresso Nacional e de discussões sobre modelos de negócios, estrutura de mercado e adoção de hubs integrados para diluição de riscos e investimentos (CNI, 2024).

O Projeto de Lei nº 1.425/2022 foi o primeiro a propor uma estrutura regulatória para captura e armazenamento ou uso do CO_2 em todo Brasil. Em agosto de 2023, o PL foi aprovado pela Comissão de Meio Ambiente (CMA) do Senado e encaminhado à Câmara dos Deputados, ainda aguardando análise e votação pelos deputados (Brasil, 2024).

Posteriormente, a Lei nº 14.993/2024, conhecida como “Combustível do Futuro”, ampliou o marco legal, tratando da transição do Brasil para uma matriz energética mais sustentável no transporte, com foco nos biocombustíveis e combustíveis sintéticos, sendo um dos tópicos discutidos a Captura e Estocagem Geológica de CO_2, com o uso de tecnologias de armazenamento de carbono no solo por até 30 anos sob supervisão da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (Brasil, 2023; CNI, 2024).

O sucesso da regulamentação e implementação do CCUS depende de um ambiente regulatório estável, previsível e seguro, alinhado com políticas públicas de incentivo à descarbonização, mercado de crédito de carbono e mecanismos robustos de financiamento. O alinhamento entre marcos regulatórios, incentivos e objetivos climáticos de longo prazo é considerado essencial para atrair investimentos e promover a inovação no setor. A expectativa é que, com a consolidação do marco regulatório e o fortalecimento institucional da ANP, o Brasil avance como protagonista na transição energética e na liderança de soluções tecnológicas para a mitigação das mudanças climáticas (CarbonCure Technologies Inc, 2023; CNI, 2024).

Apesar de avanços notáveis em tecnologias para reduzir essas emissões, como a melhoria da eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos e a diminuição da proporção de clínquer no cimento, esses métodos têm se mostrado

insuficientes para atingir as metas climáticas globais, como as estabelecidas pelo Acordo de Paris. Soluções tecnológicas mais disruptivas, embora promissoras, enfrentam desafios como altos custos de implementação, lentidão na adoção em larga escala e, muitas vezes, o risco de tornar instalações existentes obsoletas. Nesse contexto, a reutilização do CO_2 gerado na própria fabricação do cimento surge como uma alternativa altamente eficaz, escalável e economicamente viável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção da tecnologia CCUS na indústria do cimento, configura-se como um avanço estratégico e ambiental frente aos desafios da descarbonização da Net Zero by 2050 e demais metas climáticas nacionais, globais e ODS. A integração dos processos de captura, transporte, armazenamento e mineralização do CO_2 às plantas de produção de clínquer possibilita não apenas a redução efetiva das emissões pelas industrias, mas também a conversão do gás em carbonato de cálcio, incorporado à matriz cimentícia. Essa abordagem complementar contribui para o aumento da resistência e durabilidade do concreto, além de promover a economia circular e o uso eficiente de recursos. Assim, o CCUS consolida-se como uma solução inovadora, segura e escalável, capaz de posicionar o setor cimenteiro como protagonista na transição para uma construção civil sustentável e de baixo carbono.

REFERÊNCIA

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland; SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Roadmap Tecnológico do Cimento – São Paulo: ABCP/SNIC, nov. 2019. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

Architecture 2030. Why the built environment. Disponível em: https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/. Acesso em: 13 maio 2025.

BARKER, D. J. *et al*. CO_2 capture in the cement industry. Energy Procedia, v.1, Issue 1, p. 133-140, 2009.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Acordo de Paris. 2017. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4968. Acesso em: 13 maio 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Governo entrega Projeto de Lei do Combustível do Futuro**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/governo-entrega-projeto-de-lei-do-combustivel-do-futuro. Acesso em: 12 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Brasil entrega à ONU nova NDC alinhada ao Acordo de Paris**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris. Acesso em: 13 maio 2025.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei n. 1425 de 2022**. Disponível em: https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/153342. Acesso em: 12 jun. 2025.

CALDAS, L. R. *et al*. **Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento. Working Paper DIP-BR 05/2024**. Rio de Janeiro: IE-UFRJ, abril 2025. Disponível em: <https://www.ie.ufrj.br/images/IE/grupos/GIC/publica%C3%A7%C3%B5es/2025/DIP/DIP-BR_WP-5_Cadeia%20Produtiva%20do%20Cimento_v.final.pdf>. Acesso em: 18 maio. 2025.

CARBONCURE TECHNOLOGIES INC. CarbonCure's Path to the Decarbonization of Concrete. Dartmouth, NS: CarbonCure Technologies Inc., 2023. Disponível em: https://www.carboncure.com/wp-content/uploads/2023/05/CarbonCure27s20Path20to20the20Decarbonization20of20Concrete20eBook.pdf. Acesso em: 25 mai. 2025.

CASSEL, V. S. *et al*. **Potencial de captura de CO_2 de agregados graúdos reciclados de concreto no cenário nacional**. Concreto & Construções, São Paulo, v. LII, n. 116, p. 40-41. 2024. Disponível em: https://www.ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao116/Pesquisa%20e%20Desenvolvimento2_edicao116.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

CASSEL, V. S. **Tratamento com uso de CO_2 de agregados graúdos reciclados de concretos controlados: propriedades microestruturais e captura de CO_2**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

CLDP - COMMERCIAL LAW DEVELOPMENT PROGRAM. **CCUS Handbook** (versão em português). Washington, DC: CLDP, jul. 2024. Disponível em: https://cldp.doc.gov/sites/default/files/2024-07/CLDP-CCUS%20Handbook_PT.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI); ABCP -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: CNI, 2012. 58 p. (Cadernos setoriais Rio+20)

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS): experiências internacionais e o potencial brasileiro**. 1ª ed., novembro 2024. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/e1/7b/e17b2609-cd81-4496-be40-c4f90c7b40a7/id_248435_captura_utilizacao_e_armazenamento_de_carbono_interativo.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

DUTRA, P. H. *et al*. **Incorporação de óxido de grafeno em concreto: avaliação das resistências à compressão e tração**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 1, 2022.

EBC - AGÊNCIA GOVERNO ELETRÔNICO BRASILEIRO. **Taxa de desmatamento na Amazônia cai 22,3% em 2023**. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202311/taxa-de-desmatamento-na-amazonia-cai-22-3-em-2023-1#:~:text=A%20queda%20de%2022%2C3,contra%20a%20flora%20na%20Amaz%C3%B4nia. Acesso em: 13 maio 2025.

FU, X. *et al*. **Storing CO_2 while strengthening concrete by carbonating its cement in suspension**. Communications materials, v. 5, n. 1, 2024.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e 91 Engenharia de Materiais. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, cap. 29. Disponível em: https://www.academia.edu/32245363/Concreto_de_Cimento_Portland. Acesso em: 19 mai. 2025.

HÖHNE, N. *et al*. **BMZ Study: The Importance of Developing and Emerging Countries for Successful International Climate Policy**. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE) e NewClimate Institute, 2021. Disponível em:https://newclimate.org/sites/default/files/2021/09/BMZStudy_NC_DIE_ENGLISH_FullReport.pdf. Acesso em: 13 maio 2025.

HUIJGEN, W.J.J.; COMANS, R.N.J**. Carbon Dioxide Sequestration By Mineral Carbonation, Literature Review**. Energy Research Centre Of The Netherlands. 2003.

IBP - INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Capacidade do setor de captura e armazenamento de carbono (CCUS)**. In: Observatório do Setor. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/capacidade-do-setor-de-captura-e-armazenamento-de-carbono-ccus/>. Acesso em: 11 mai. 2025.

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Caminhos para a descarbonização (versão em português). Disponível em: https://www.ibp.org.br/media/caminhos-para-a-descarbonizacao-portugues.pdf. Acesso em: 11 mai. 2025.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050: a Roadmap for the Global Energy Sector**. Paris: IEA; 2021. 225 p. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 28 mai. 2025.

IEMA - INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **COP27: Brasil está se distanciando das suas metas propostas ao Acordo de Paris**. 2022. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/cop27-brasil-esta-se-distanciando-das-suas-metas-propostas-ao-acordo-de-paris-20221110. Acesso em: 13 maio 2025.

KELEMEN, P. *et al*. **Uma Visão Geral Do Status E Dos Desafios Do CO_2 Armazenamento Em Minerais E Formações Geológicas**. Frente. Clim. V. 1, 9. 2019.

MIRANDA, J. L. *et al*. **Antropoceno e o CO_2: Processos de Captura e Conversão**. Revista Virtual de Química, v. 6, p. 1915-1946, 2018.

NITROTEC**.** Saiba a diferença entre tanques de CO_2 com isolamento a vácuo x tanques de CO_2 com isolamento em poliuretano. Nitrotec, 2020. Disponível em: <https://nitrotec.com.br/global/saiba-a-diferenca-entre-tanques-de-c02-com-isolamento-a-vacuo-x-tanques-de-c02-com-isolamento-poliuretano/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

OGCI - OIL AND GAS CLIMATE INITIATIVE. **Hubs de CCUS no Brasil: Construindo cenários, superando barreiras.** Relatório, fevereiro 2024. Instrui um estudo proprietário da S&P Global (maio 2023) e pesquisa documental complementar. Disponivel: <https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2024/03/CCUS-Brazil-WP-PT-vf.pdf>. Acesso em: 13 de mai. de 2025.

OLIVEIRA, G. B. de. **Captura e mineralização de CO_2 em processo de recirculação de amina modificado**. Orientador: Dr. Domingos Fabiano de Santana Souza. 2024. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - Brasil. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 14 mai. 2025.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO**. Balanço Anual de 2024**. Brasília: SNIC, 2025. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/resultados-preliminares/1736861397.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Consumo aparente de cimento por regiões e estados (i)**. 2023. São Paulo: SNIC, 2024. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-do-setor.php. Acesso em: 02 jun. 2025.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números da Indústria do Cimento – 2024**. [Rio de Janeiro]: SNIC, 2024. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1720464057.pdf. Acesso em: 02 jun. 2025.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Números do setor. SNIC, 2022. Disponível em: http://snic.org.br/numeros-do-setor.php. Acesso em: 10 out. 2025.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO; ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Coordenação de Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

World Population Review. ***Brazil***. 2023. Disponível em: https://worldpopulationreview.com/countries/brazil. Acesso em 13 de jul. de 2025.