

DECARBONIZATION AND INDUSTRIAL POLICY: CHALLENGES FOR BRAZIL

Working Paper DIP-BR 05/2024

Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento

Lucas R. Caldas

Lívia C. Silva

Thaís P. L. Siqueira

Romildo D. Toledo Filho

DECARBONIZATION AND INDUSTRIAL POLICY: CHALLENGES FOR BRAZIL

About the Project DIP-BR

“Decarbonization and Industrial Policy: Challenges for Brazil” (DIP-BR) is a policy-oriented research-action project aimed at influencing public debate on industrial, innovation, and trade policies in Brazil and selected Latin American countries that promote decarbonization and energy transition in the region. The initiative seeks to inform and induce efficacy, efficiency, effectiveness, and innovativeness in policy design and implementation. The methodology encompasses critical benchmarking analyses of past and present policy experiences from an international comparative perspective, regional trade studies, and economic analyses of productive sectors and chains, combining structural analysis of traditional production, employment, and trade statistics and simulation models of sectoral impacts using input-output approach.

Funded by the Open Society Foundations (OSF), Project DIP-BR is executed by the Research Group of Industry and Competitiveness at the Institute of Economics, Federal University of Rio de Janeiro (GIC/IE-UFRJ, <https://www.ie.ufrj.br/gic>) and is currently managed through José Bonifácio University Foundation (<https://www.fujb.ufrj.br/>).

Project DIP-BR Team

Head Investigator

Carlos Frederico Leão Rocha
IE-UFRJ

Main Research Team

João Carlos Ferraz
IE-UFRJ

Marta Castilho
IE-UFRJ

Fabio Freitas
IE-UFRJ

Kaio Vital
IE-UFRJ

Julia Torracca
IE-UFRJ

Wilson Peres
IE-UFRJ

Consulting Team

Agrifood Industry
John Wilkinson
UFRRJ

Cement Industry
Lucas Rosse Caldas
FAU-UFRJ, COPPE-UFRJ

Thaís Pinto Lôbo Siqueira,
COPPE-UFRJ

Lívia Corrêa Silva
COPPE-UFRJ

Romildo Dias Toledo Filho
COPPE-UFRJ

Steel Industry
Germano Mendes de Paula
IERI-UFU

Research Assistants

Bruna Ribeiro
IE-UFRJ

Gabriel Pessanha
IE-UFRJ

Tatiana Fleming
IE-UFRJ

Nilo Bezerra Neto
IE-UFRJ

Project Manager
Carolina Dias
IE-UFRJ

Graphic Designer
Galadriel Design

Communication
Carolina Eloy

DECARBONIZATION AND INDUSTRIAL POLICY: CHALLENGES FOR BRAZIL

Working Paper DIP-BR 05/2024

Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento

Lucas R. Caldas^a

Lívia C. Silva^b

Thaís P. L. Siqueira^c

Romildo D. Toledo Filho^d

^a Professor do Programa de Engenharia Civil (PEC/COPPE) e do Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3108-2833>. E-mail: lrc@coc.ufrj.br.

^b Pesquisadora do Programa de Engenharia Civil (PEC/COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6295-9717>. E-mail: liviacorrea@poli.ufrj.br.

^c Doutoranda do Programa de Engenharia Civil (PEC/COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1124-5698>. E-mail: thais.siqueira@coc.ufrj.br.

^d Professor Titular do Programa de Engenharia Civil (PEC/COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5867-4452>. E-mail: toledo@coc.ufrj.br.

DESCARBONIZAÇÃO E POLÍTICA INDUSTRIAL: DESAFIOS PARA A CADEIA DO CIMENTO

RESUMO

O processo de produção de cimento é energo-intensivo, sendo responsável por um consumo significativo de combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono. A indústria cimenteira é responsável por 7 a 8% das emissões de CO₂ globais, emitindo mais de 1,5 GtCO₂/ano. No contexto brasileiro, a descarbonização desta indústria é peça-chave para um futuro de baixo carbono, especialmente considerando que o consumo do cimento deve aumentar nos próximos anos, podendo chegar a mais de 100 Mt até 2050. O presente estudo se propõe a apresentar a cadeia produtiva do cimento e seus produtos correlatos, situando o contexto brasileiro em um panorama internacional de descarbonização e identificando, principalmente, *stakeholders*, soluções tecnológicas, práticas ambientais e de inovação, ameaças e oportunidades e o desenho de uma política nacional. Entre as principais possibilidades de mitigação das emissões do setor no cenário internacional e brasileiro estão: (1) reduzir a quantidade de clínquer no cimento (aumento das adições minerais, principalmente filer calcário), (2) substituir combustíveis fósseis por combustíveis alternativos com menor pegada de carbono, (3) melhorar a eficiência energética do processo de produção, e (4) implementar tecnologias inovadoras, como a captura e o armazenamento de carbono. Além do escopo das indústrias de cimento, é importante avaliar os principais materiais cimentícios utilizados: argamassa e concreto, em termos de sua produção e uso nas edificações, existindo uma oportunidade considerável de redução da emissão de carbono, a partir da melhoria no projeto e processo de construção. Para a indústria cimenteira brasileira atingir a neutralidade de carbono até 2050, a maior parcela será referente ao uso de soluções inovadoras de remoções e/ou compensações que representarão entre de 27 a 39% do total de emissões de carbono. Para uma política de sustentabilidade do setor, elencam-se: (1) revisão normativa e desenvolvimento de mecanismos de regulação; (2) maior integração entre as diferentes indústrias e setores correlacionados; (3) fortalecimento da interação entre toda a cadeia e dos diferentes *stakeholders* da indústria da construção civil e infraestrutura; (4) avaliação econômica das medidas propostas de descarbonização e seu impacto no custo final do produto e edificações; (5) precificação do carbono e mecanismos de financiamento que suportem a transição para um processo de baixo carbono; (6) combate à informalidade do setor e investimento em

educação e capacitação; (7) disponibilidade de indicadores de carbono realistas e ferramentas de cálculo e de projetos de edificações e de infraestrutura de baixo carbono; (8) maior integração com outras políticas públicas, projetos e programas governamentais e compatibilização com iniciativas existentes entre as diferentes esferas (federal, estadual e municipal) e do setor privado; e (9) análise transetorial e *trade-offs* entre indicadores ambientais, econômicos e sociais. Os achados deste estudo irão beneficiar o setor de cimentos, como também, produtores que fazem uso desse material, indústrias de concreto e argamassa, como também o setor da construção civil e de edificações e o país, como um todo.

PALAVRAS-CHAVE

Cimento. Materiais cimentícios. Construção civil. Mudança climática. Descarbonização.

DECARBONIZATION AND INDUSTRIAL POLICY: CHALLENGES FOR THE CEMENT CHAIN

ABSTRACT

The cement production process is energy-intensive, accounting for significant consumption of fossil fuels and greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide. The cement industry is responsible for 7 to 8% of global CO₂ emissions, emitting more than 1.5 GtCO₂/year. In the Brazilian context, decarbonizing this industry is key to a low-carbon future for the country, especially considering that cement consumption is expected to increase in the coming years, reaching more than 100 Mt by 2050. This study aims to present the cement production chain and its related products, placing the Brazilian context in an international panorama of decarbonization and identifying stakeholders, technological solutions, environmental and innovation practices, threats and opportunities, and the design of a national policy. The main possibilities for mitigating emissions in the sector in the international and Brazilian scenarios include: (1) reducing the amount of clinker in cement (increasing mineral additions, mainly limestone filler); (2) replacing fossil fuels with alternative fuels with a lower carbon footprint; (3) improving the energy efficiency of the production process; and (4) implementing innovative technologies, such as carbon capture and storage. In addition, it is important to evaluate the main cementitious materials used in the cement industry: mortar and concrete, in terms of their production and use in buildings, as there is a considerable opportunity to reduce carbon emissions by improving the design and construction process. For the Brazilian cement industry to achieve carbon neutrality by 2050, the largest share will be related to the use of innovative removal and/or offset solutions that will represent between 27 and 39% of total carbon emissions. For a sustainability policy in the sector, the following are listed: (1) regulatory review and development of regulatory mechanisms; (2) greater integration between the different industries and related sectors; (3) strengthening of the interaction between the entire chain and the different stakeholders in the construction and infrastructure industry; (4) economic evaluation of the proposed decarbonization measures and their impact on the final cost of the product and buildings; (5) carbon pricing and financing mechanisms that support the transition to a low-carbon process; (6) combating informality in the sector and investing in education and training; (7) availability of realistic carbon indicators and calculation tools and low-carbon building and infrastructure projects; (8) greater integration with other public policies, projects and

government programs and compatibility with existing initiatives between the different spheres (federal, state and municipal) and the private sector; and (9) cross-sectoral analysis and trade-offs between environmental, economic and social indicators. The findings of this study will benefit the cement sector, as well as producers who use this material, concrete and mortar industries, as well as the construction and building sector and the country as a whole.

KEYWORDS

Cement. Cementitious materials. Construction industry. Climate change. Decarbonization.

Sumário

Introdução, contextualização e delimitação do escopo	09
1. Identificação dos <i>stakeholders</i> e da relação entre eles	10
1.1. Mapeamento dos <i>stakeholders da cadeia</i> produtivas do cimento e artefatos	10
1.2. Identificação da relação com <i>stakeholders</i> de outros setores produtivos	13
2. Perspectiva internacional	15
2.1. Tendências atuais e futuras nas cadeias produtivas de cimento pelo mundo	17
3. Perspectiva brasileira	20
3.1. Indicador de intensidade de carbono da cadeia produtiva do cimento nacional	20
3.2. Influência de setores (<i>downstream</i> e <i>upstream</i>) nas emissões de carbono da cadeia produtiva de cimento	25
3.3. Tendências atuais e futuras nas cadeias produtivas de cimento no Brasil	27
3.4. Mapeamento das práticas ambientais e de inovação da indústria nacional	32
3.5. Tecnologias potenciais para Brasil e países da América Latina	35
4. Análise da dimensão política	37
4.1. Mapeamento das mais relevantes políticas da cadeia produtiva de cimento no mundo	37
4.2. Análise da integração de fatores de inclusão social e transição energética nos instrumentos das políticas de descarbonização da cadeia produtiva do cimento	39
4.3. Levantamento das iniciativas no Brasil e suas barreiras	40
5. Desenho da política	44
5.1. Análise das estratégias de sucesso internacional que podem ser replicadas/adaptadas no Brasil	44
5.2. Análise dos aspectos essenciais para uma política de sustentabilidade industrial da cadeia produtiva de cimento	47
5.3. Análise SWOT e avaliação dos nichos da cadeia produtiva de cimento por viabilidade de políticas de sustentabilidade	48
6. Conclusão	51
Referências	52

Introdução

O cimento é um dos materiais industriais mais consumidos no mundo, utilizado principalmente, no setor habitacional e de infraestrutura, com um consumo estimado de 250 – 500 kg/hab.ano no Norte Global, 1.600 kg/hab.ano, na China (Boanada-Fuchs; Heierli; Scrivener, 2024) e em torno de 200 kg/hab.ano no Brasil (Visedo; Pecchio, 2019). No ano de 2022, a produção estimada foi de 4,1 Gt de cimento no mundo, sendo a China, Índia e Estados Unidos os principais produtores (Barbhuiya *et al.*, 2024). Globalmente, espera-se um crescimento mais expressivo nos países do Sul Global, onde existe ainda um grande déficit habitacional e de infraestrutura.

O processo de produção de cimento é energo-intensivo, sendo responsável por um consumo significativo de combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa (GEEs), em especial o dióxido de carbono (CO_2), pelo processo de descarbonatação, na decomposição do carbonato de cálcio (calcário), para a produção do clínquer, que representa cerca 60% das emissões de CO_2 , queima de combustíveis (39%) e eletricidade (1%) (Visedo; Pecchio, 2019; Reis *et al.*, 2023). Estima-se que a indústria cimenteira é responsável por 7 a 8% das emissões de CO_2 globais, com mais de 1,5 Gt CO_2 /ano (Barbhuiya; Das; Adak, 2024; Habert *et al.*, 2020) para o ano de 2020.

No Brasil, essa indústria foi responsável por 26% das emissões do setor industrial, representando 1-2% de todas as emissões nacionais, com 20,83 Mt CO_2 e para o ano de 2022, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (Observatório do Clima, 2024). Neste contexto, a descarbonização desta indústria é uma peça-chave para um futuro de baixo carbono no país, especialmente considerando que o consumo de cimento deve aumentar nos próximos anos, passando de 71 Mt em 2014, podendo chegar a 117 Mt até 2050 (Visedo; Pecchio, 2019).

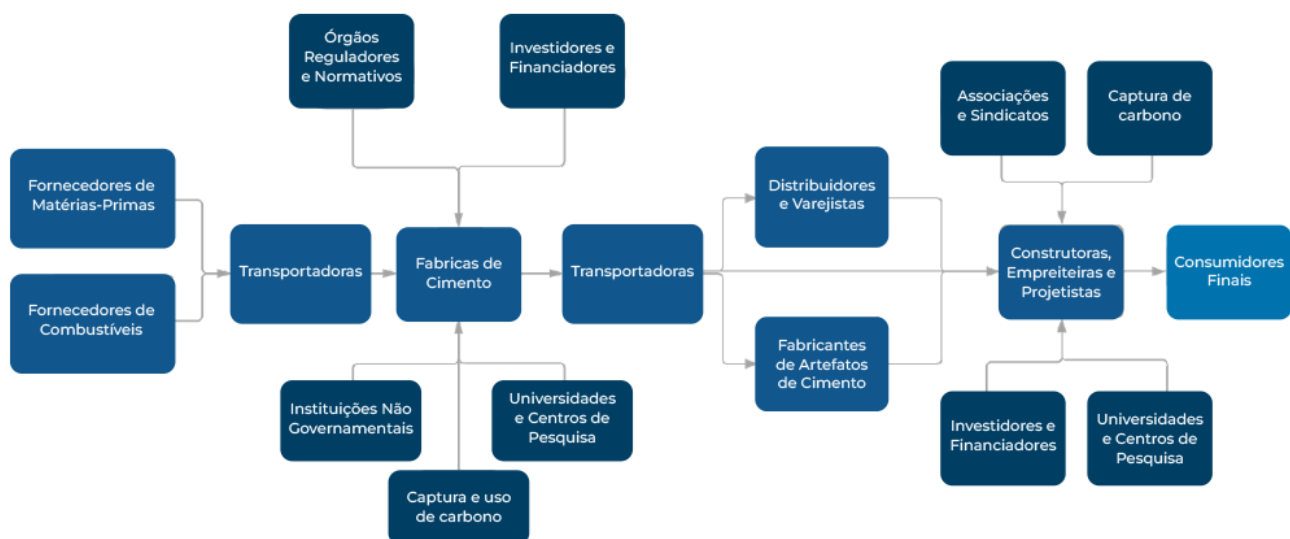
O presente estudo se propõe a apresentar a cadeia produtiva do cimento e seus produtos correlatos, situando o contexto brasileiro em um panorama internacional de descarbonização e identificando principalmente: *stakeholders*, soluções tecnológicas, práticas ambientais e de inovação, ameaças e oportunidades e o desenho de uma política nacional. Os achados do presente documento irão beneficiar o setor de cimentos, como também atores indiretamente relacionados, entres eles, produtores que fazem uso desse material, por exemplo, indústrias de concreto e argamassas, além do setor da construção civil e de edificações e o país como um todo.

1. Identificação dos *stakeholders* e da relação entre eles

1.1. Mapeamento dos *stakeholders* da cadeia produtivas do cimento e artefatos

A cadeia produtiva do cimento e seus artefatos é complexa e envolve diversos *stakeholders* que desempenham papéis chave nas diferentes etapas do processo de produção, distribuição até o seu uso final, conforme mostra a **Figura 1** (Barbhuiya; Bhusan Das; Adak, 2024; Barbhuiya *et al.*, 2024; Habert *et al.*, 2020a; Shivaprasad *et al.*, 2024).

Figura 1 - Relação entre os *stakeholders* da cadeia produtiva do cimento



Fonte: Elaboração própria.

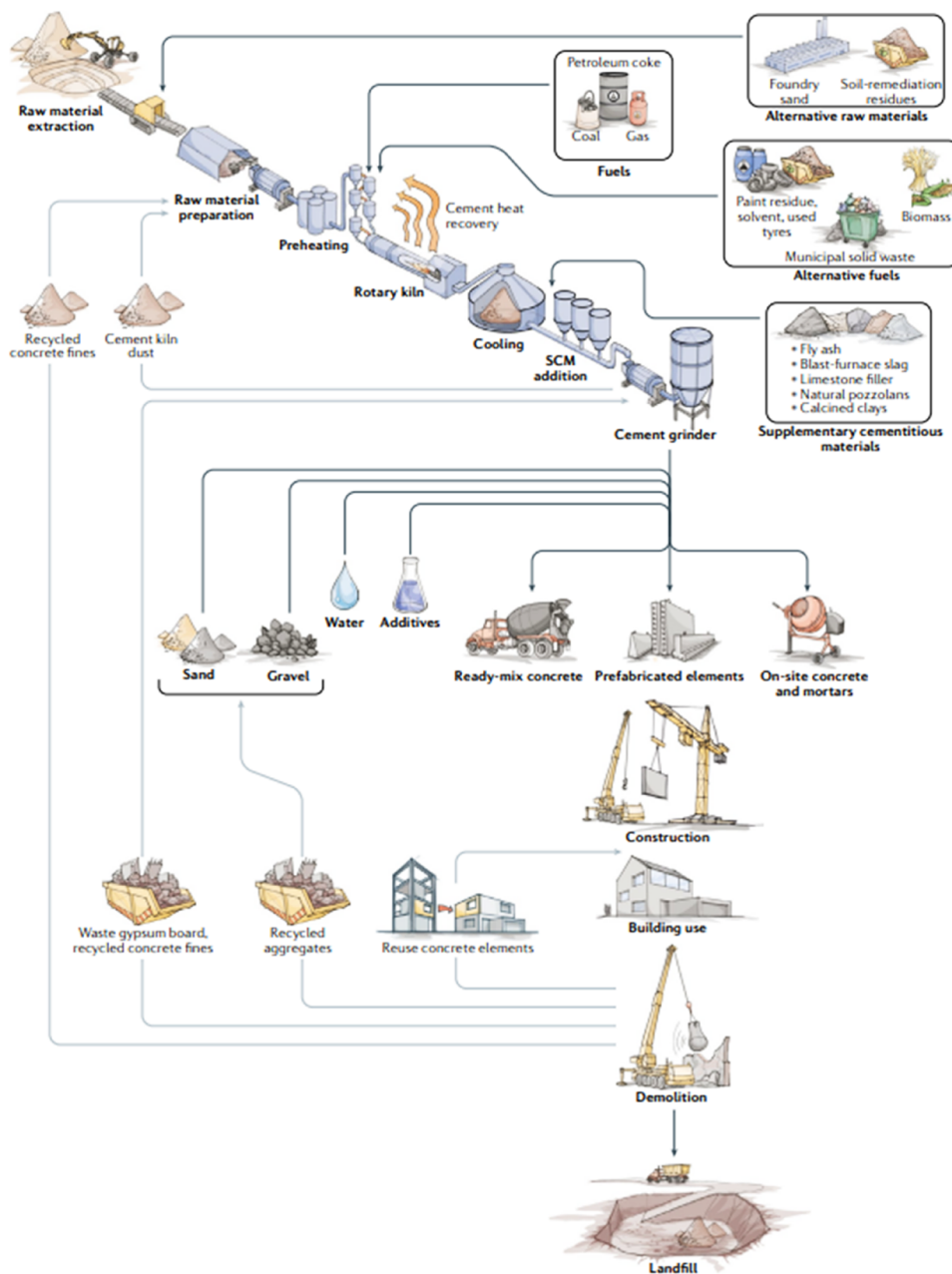
- **Fornecedores de Matérias-Primas:** fornecedores de insumos básicos como calcário, argila, areia, ferro, gesso e aditivos minerais (escória granulada de alto forno, cinza volante etc.).
- **Fornecedores de Combustíveis:** fornecedores dos principais combustíveis empregados na produção: coque de petróleo, carvão vegetal e os diferentes resíduos empregados no coprocessamento: biomassa, pneus, plásticos etc.

- **Fabricantes de Cimento:** fábricas e indústrias que transformam as matérias-primas em cimento.
- **Distribuidores e Varejistas:** empresas que compram o cimento das fábricas e o distribuem para pontos de venda ou diretamente para os consumidores finais.
- **Fabricantes de Artefatos de Cimento:** empresas que produzem itens como o concreto usinado, concreto pré-fabricado, blocos, telhas, tubos e outros produtos de base cimentícia
- **Construtoras e Empreiteiras:** empresas que utilizam o cimento e seus artefatos na construção de edifícios, infraestruturas e obras civis.
- **Projetistas:** profissionais (arquitetos e engenheiros) que especificam o uso do cimento e seus derivados nos projetos de construção.
- **Consumidores Finais:** proprietários de imóveis, empresas e governo que consomem os produtos finais.
- **Órgãos Reguladores e Normativos:** instituições governamentais e organizações que estabelecem normas, regulamentos e padrões de qualidade e segurança para a produção e utilização do cimento, tais como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- **Instituições Não Governamentais:** Um dos exemplos é “O Cimento.org” organização sem fins lucrativos que divulga informações do mercado cimenteiro brasileiro e internacional.
- **Transportadores:** empresas de logística que fazem o transporte das matérias-primas para as fábricas e dos produtos acabados para os distribuidores e consumidores finais.
- **Associações e Sindicatos:** organizações que representam os interesses dos trabalhadores e das empresas do setor de cimento, dentre elas a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Podem aqui ser citadas também aquelas relacionadas aos artefatos de cimento, como o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), a Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (ABCIC), a Indústria Brasileira de Pré-Moldados (IBPRÉ).
- **Investidores e Financiadores:** Instituições financeiras e investidores que fornecem capital para a operação e expansão das empresas da cadeia produtiva.

- **Universidades e Centros de Pesquisa:** instituições que conduzem pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos para melhorar a eficiência e sustentabilidade do setor, contribuindo para inovação de produtos e processos.
- **Captura e uso de carbono:** empresas ligadas às tecnologias de captura, armazenamento e uso de carbono. Espera-se que essas empresas se tornem cada vez mais importantes a partir que metas de redução de carbono se estabeleçam no setor.

Esses *stakeholders*, em conjunto, precisam colaborar de diferentes formas para assegurar que o cimento e seus artefatos sejam produzidos com qualidade e desempenho adequado, distribuídos e utilizados de forma eficaz e eficiente. Essa colaboração é fundamental para a descarbonização e para a promoção da economia circular. O alinhamento de estratégias e metas possibilita a diminuição do desperdício na geração de resíduos e sua recirculação na cadeia produtiva (Habert *et al.*, 2020b), conforme apresentado na **Figura 2**. No entanto, na prática, essa relação é cada vez mais dificultada a partir do momento que os *stakeholders* vão se distanciando uns dos outros dentro da cadeia, como por exemplo, fabricantes de materiais dos construtores e empresas de demolição.

Figura 2 - A cadeia de valor do cimento: da extração de matéria-prima à demolição de edifícios



Fonte: Habert et al. (2020).

1.2. Identificação da relação com *stakeholders* de outros setores produtivos

Além da relação entre os *stakeholders* identificados da cadeia produtiva de cimento e seus artefatos, é importante identificar a relação com outros setores produtivos, especialmente, os fornecedores de matérias primas e combustíveis utilizadas na produção do cimento. Dentre esses setores, podem ser citados:

- **Setor do aço:** a escória granulada de alto forno é um coproduto oriundo da produção do aço, especificamente na produção do ferro gusa. A escória é um dos principais materiais cimentícios suplementares utilizados em substituição ao clínquer. Sua disponibilidade tende a diminuir a partir do momento que as indústrias de aço se tornem mais eficientes. Por outro lado, observa-se que ambos os setores são energo-intensivos, podendo haver competição quando se trata de redução das emissões por substituição de fontes energética, como é o caso do carvão vegetal.
- **Setor industrial e da agropecuária:** existem diferentes fontes de biomassa, com destaque especial para resíduos industriais (ex. setor madeireiro, papel e celulose, etc) e da agropecuária (arroz, milho, feijão, cana de açúcar, etc.) no Brasil. Algumas dessas biomassas já são aproveitadas nos locais de geração ou empregadas em outras indústrias, tendo assim sua disponibilidade restringida para a indústria de cimento.
- **Setor energético - termelétricas a carvão:** a cinza volante é um coproduto oriundo dessas termelétricas. Sua disponibilidade tende também a diminuir a partir do momento que essa fonte energética tende a ser proibida e limitada em muitos países.
- **Setor urbano:** resíduos sólidos urbanos e lodos de estação de tratamento de água e esgoto têm potencial energético a ser aproveitado no setor de cimento. Importante entender a disponibilidade futura e potencial técnico e regulatório para a aplicação na produção do cimento (ex. emprego no maquinário existente, possibilidade de comprometimento da qualidade do produto final, etc.).

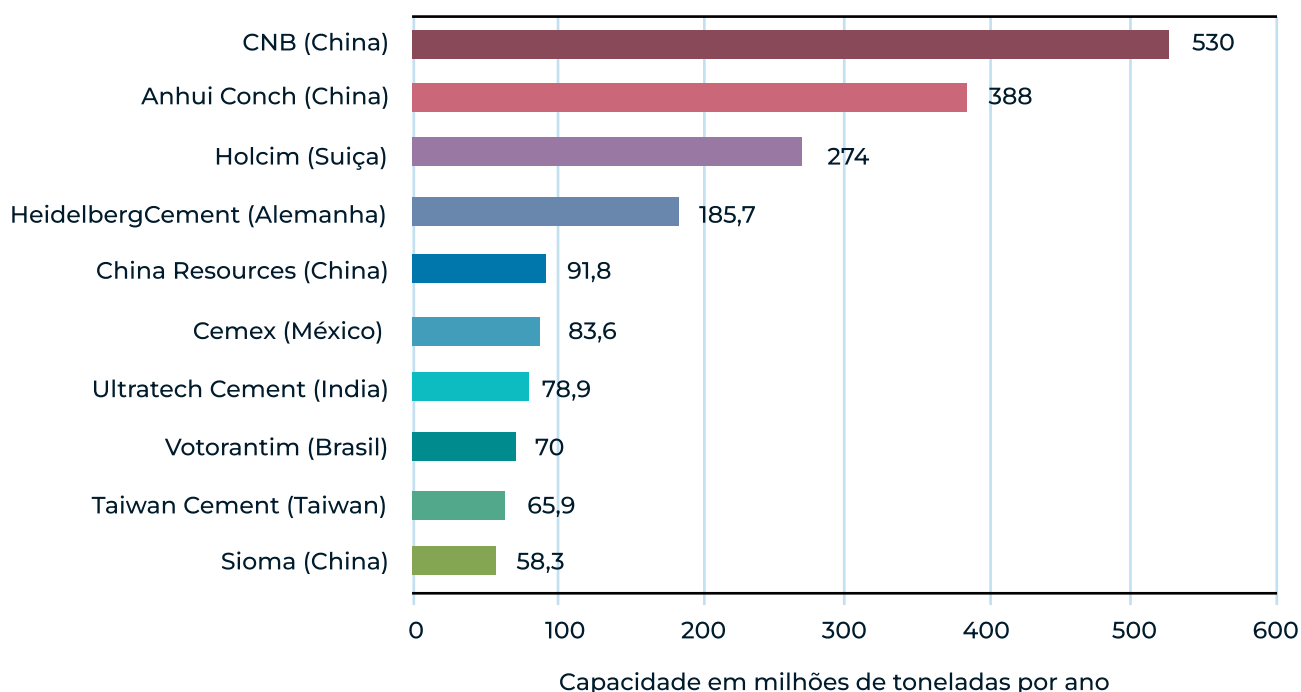
Entender a relação com esses setores citados acima é essencial para o setor de cimentos, pois as principais e mais efetivas estratégias de descarbonização estão diretamente ou indiretamente relacionadas à disponibilidade dos materiais originados nessas indústrias, seja na forma de matéria-prima substituinte ao clínquer (cinza volante e escória granulada de alto forno), como também na forma de combustíveis alternativos ao coque de petróleo.

Assim, além das relações com os setores já amplamente estabelecidas, como o caso do aço, a cadeia de cimentos deve buscar oportunidades em outros setores, especialmente, no setor agroindustrial, no qual as biomassas e as biocinzas provenientes de produções como a sucroalcooleira e de arroz são matérias-primas de origem biogênica. No entanto, encontrar resíduos que possam ser utilizados como coprodutos não é tarefa fácil, pois é preciso encontrar aquele com propriedades físico-químicas compatíveis e, além disso, atender a questões de logística e oferta mínima (Habert *et al.*, 2020b).

2. Perspectiva Internacional

O setor de cimento é dominado por algumas empresas internacionais de grande porte, sendo as 10 maiores produtoras de cimento responsáveis por parte significativa da produção e distribuição deste material mundialmente (**Figura 3**). Entre elas estão gigantes como a China National Building Material (CNB) e a Anhui Conch, ambas da China, que lideram a produção mundial com capacidades superiores a 300 milhões de toneladas anuais. Seguem-se outras empresas importantes como a LafargeHolcim, uma multinacional suíço-francesa, e a HeidelbergCement, da Alemanha, que têm presença global. Cemex, do México, e Votorantim Cimentos, do Brasil, são representantes das Américas nesse ranking. Empresas como UltraTech Cement da Índia e Taiwan Cement também figuram entre os líderes, fortalecendo a posição da Ásia no setor. Essas companhias, com operações espalhadas por diversos países, investem em tecnologia, soluções de sustentabilidade e expansão para atender à crescente demanda global por cimento.

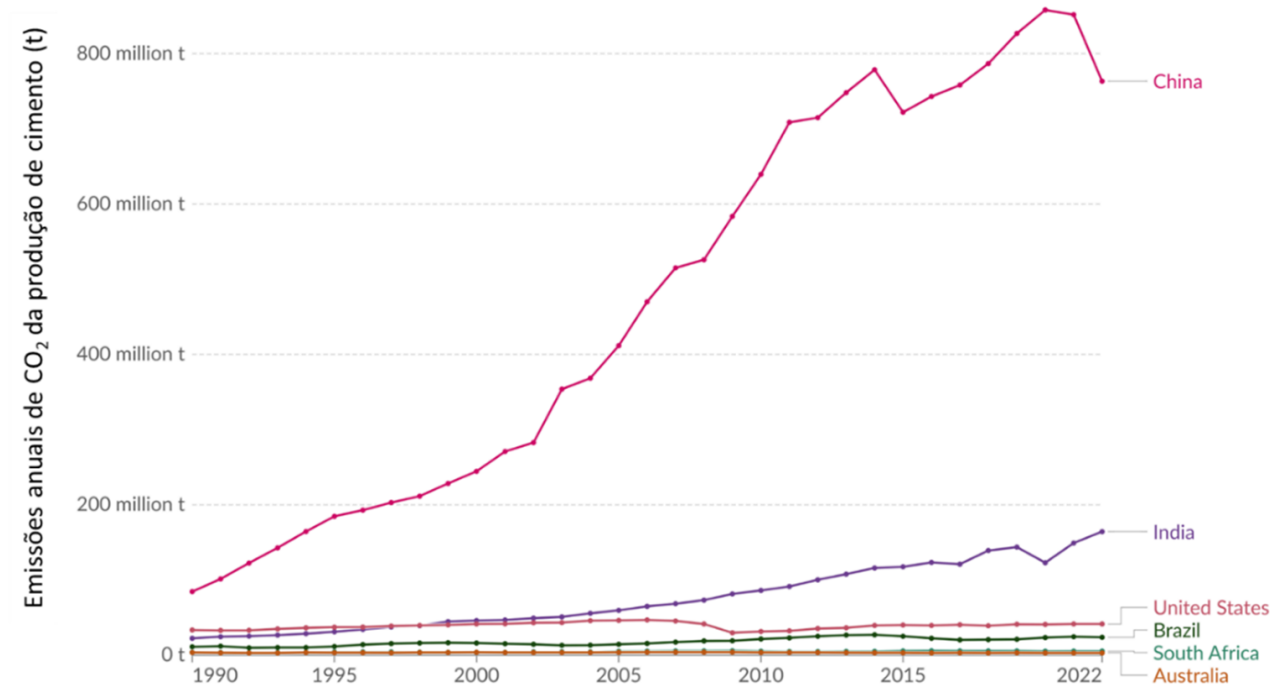
Figura 3 - Capacidade de produção das principais fábricas de cimento do mundo



Fonte: Statista (2024).

Dada a sua enorme produção de cimento, a China é o país com maior emissão de CO₂, seguido pela Índia na (Figura 4). Esses países, por ainda apresentarem uma elevada demanda habitacional apresentam um crescente consumo de cimento e concreto, o que impacta diretamente nas emissões relacionados ao processo produtivo desses materiais.

Figura 4 - Emissões anuais de CO₂ do cimento



Fonte: Our World in Data (2024).

Além das emissões associadas à descarbonatação do calcário, parte dessas emissões se devem às matrizes energéticas e elétricas utilizadas nesses países. Na China, a maior parte da energia vem de usinas termoeletricas, principalmente a carvão mineral, chegando a mais de 60%. Na Índia, é similar, sendo a principal fonte também o carvão mineral, com participação superior a 40% e petróleo com mais de 20%. Na Europa, a fonte mais utilizada de energia é o petróleo, com mais de 30% da matriz, seguido do carvão mineral, com 13,1%. Já nos Estados Unidos, 35,4% da energia são provenientes do uso de gás natural e 35,2% de petróleo (IEA, 2024).

A realidade da indústria cimenteira internacional se difere da nacional de maneira significativa, uma vez que o Brasil possui uma das matrizes de energia e energia elétrica mais limpas (em termos de carbono) do mundo e um setor de produção de cimento dos mais tecnológicos e eficientes.

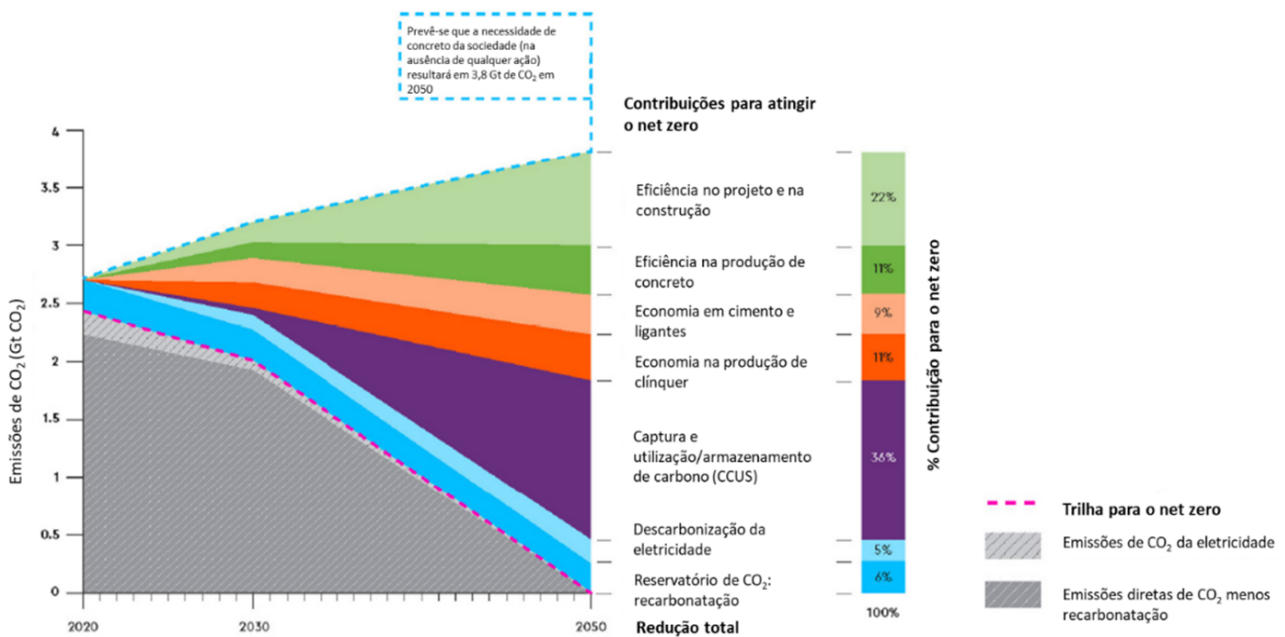
2.1. Tendências atuais e futuras nas cadeias produtivas de cimento pelo mundo

No âmbito internacional, existem iniciativas que merecem destaque em termos de estratégias de mitigação da emissão de carbono no setor de cimento. De acordo com o levantamento realizado pelo Reis *et al.* (2023), no início dos anos 2000, houve a criação do *Cement Sustainability Initiative* (CSI), sob comando do *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), que instituiu um padrão global de medição de CO₂ para a indústria, alinhado às metodologias do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC). Em 2008, foi publicado o primeiro *roadmap* juntamente com a *International Energy Agency* (IEA). Posteriormente, foi criada a *Global Cement and Concrete Association* (GCCA) que publicou, em 2021, um *roadmap* atualizado com mais estratégias para se conseguir atingir a meta zero de emissões líquidas de carbono em 2050. Parte importante dos dados e informações disponíveis do setor de cimento vêm desses estudos e publicações.

Entre as principais possibilidades de mitigação das elevadas emissões do setor no cenário internacional estão: (i) a redução da quantidade de clínquer no cimento, (ii) a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos com menor pegada de carbono, (iii) a melhoria da eficiência energética do processo de produção, e a (iv) implementação de tecnologias inovadoras, como a captura e armazenamento de carbono (IEA, 2018).

A redução da quantidade de clínquer pode representar uma redução de cerca de 11% nas emissões de CO₂. Isso se deve ao fato de que o processo de produção do clínquer é uma das etapas mais intensivas em carbono em todo o processo de fabricação do cimento. A substituição por combustíveis de baixo carbono também desempenha um papel significativo na redução das emissões, apesar de não apresentar o mesmo impacto de outras estratégias. Melhorias na eficiência energética do processo também são essenciais, principalmente em países com baixa utilização de combustíveis alternativos e com matrizes de energia elétrica intensivas em carbono (IEA, 2018; GCCA, 2023). A captura de carbono é considerada uma das tecnologias mais promissoras para a neutralidade do setor (**Figura 5**).

Figura 5 - Caminho para o net zero da indústria do cimento internacional



Fonte: GCCA (2023).

Habert *et al.* (2020) destacam a importância do desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como as de Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon capture and storage* - CCS) e Captura, Uso e Estocagem de Carbono (*Carbon Capture, Utilisation and Storage* - CCUS), para atingir as metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa. Porém, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios significativos em termos de custo e aplicação em larga escala. Elevados custos que chegam a US\$ 100 por tonelada de CO₂, podem mais que dobrar o custo do clínquer e do cimento (Scrivener *et al.*, 2018). No médio prazo, é fundamental focar na eficiência em todas as etapas da cadeia produtiva, desde a produção de clínquer até o uso de concreto em construções, além de adotar estratégias de projeto que minimizem o uso de concreto e incentivem a reutilização e a reciclagem de elementos de concreto.

Um estudo realizado por Cheng *et al.* (2023) mostra ainda que a indústria do cimento pode atuar como um potencial sumidouro de CO₂, dada a capacidade que os produtos à base de cimento têm de reabsorver CO₂ ao longo de sua vida útil (pelo processo de carbonatação). No entanto, o estudo aponta que para maximizar este potencial se faz necessário um esforço integrado que considere aspectos econômicos, como custo e viabilidade de tecnologias de baixo carbono.

Além disso, é de significativa importância a adoção de um modelo de projeção de emissões que considere a recuperação de calor residual, melhorias na eficiência de construção e projeto, estratégias de mitigação relacionadas à cadeia de valor, e reciclagem de resíduos de construção e demolição uma vez que com este modelo seria possível se fazer uma avaliação mais precisa do potencial de mitigação da indústria do cimento, levando em conta os efeitos combinados de diferentes medidas. Os resultados de Cheng *et al.* (2023) destacam a necessidade de uma abordagem integrada para reduzir os impactos ambientais da indústria do cimento com a implementação de tecnologias inovadoras e práticas de construção sustentáveis.

A incorporação de *biochar* (carvão vegetal) na produção de cimento também surge com grande potencial para mitigar os impactos ambientais desse setor. Um estudo realizado por Sanei *et al.* (2024) demonstra que o *biochar*, especialmente quando produzido a temperaturas superiores a 550°C, possui uma capacidade significativa de sequestro de carbono. Nessa condição, o carbono no *biochar* adquire uma estrutura similar ao “inertinito”, uma forma altamente estável de carbono encontrada na crosta terrestre. Segundo a Indústria Europeia de Biochar (EBI, 2024), além de contribuir para a remoção de CO₂ da atmosfera o *biochar* também aprimora as propriedades mecânicas do concreto, como resistência, durabilidade e isolamento térmico. A incorporação de *biochar* pode melhorar a resistência inicial do concreto quando utilizado em concentrações baixas (1-3%), devido ao efeito de preenchimento e à retenção de água, que melhora a hidratação do cimento. Pode ainda aumentar significativamente a resistência à fratura, com melhorias observadas de até 150% em alguns casos, dependendo do tipo e do tamanho do *biochar* (Murali e Wong, 2024).

Segundo o EBI (2024), uma vez incorporado ao concreto, o *biochar* permanece firmemente ligado à matriz cimentícia, garantindo o armazenamento de carbono de forma prolongada e com reduzida probabilidade de degradação ou liberação de CO₂. Mesmo em processos de reutilização ou reciclagem do concreto, o carbono sequestrado permanece estável, sem ser reemitido ao meio ambiente.

Em suma, a utilização do *biochar* na produção de cimento e de concreto tem potencial para figurar como uma alternativa viável e sustentável de otimizar a captura de carbono e reduzir os custos operacionais, representando uma estratégia promissora para a descarbonização da indústria cimenteira (EBI, 2024). Contudo, ainda são necessárias análises de ciclo de vida mais abrangentes para avaliar cenários adicionais.

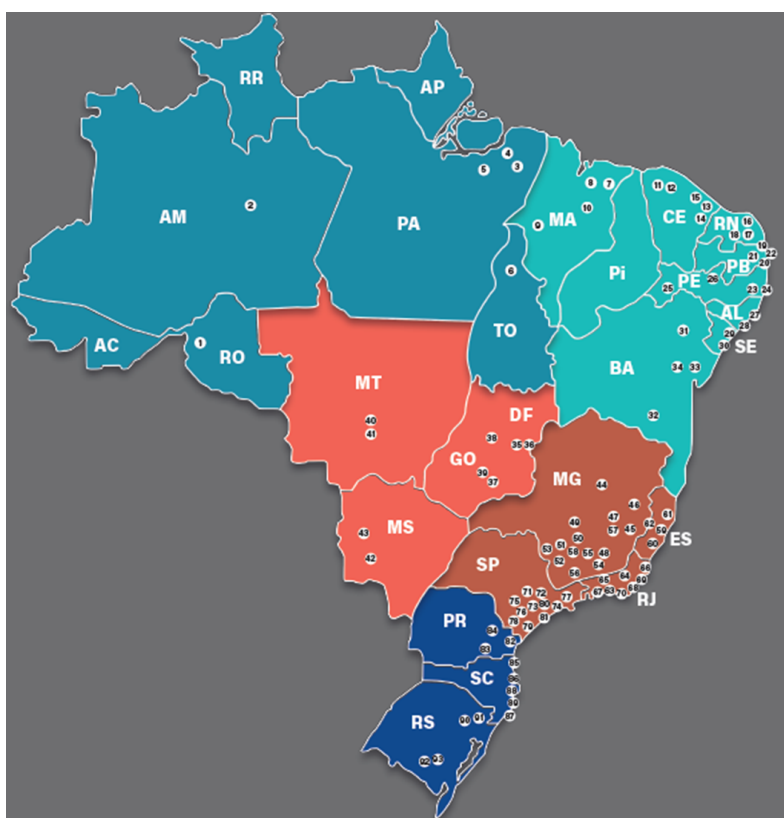
3. Perspectiva Brasileira

3.1. Indicador de intensidade de carbono da cadeia produtiva do cimento nacional

De acordo com o levantamento realizado pelo SNIC (2024), em 2023, o Brasil registrou um consumo de 62,2 Mt de cimento no ano referido, sendo que a região Sudeste foi responsável pela maior parte desse consumo. Além disso, Brasil possui 93 fábricas distribuídas pelo território nacional, com uma capacidade total de produção estimada em 94 Mt por ano (SNIC, 2024).

No cenário brasileiro, o mercado de cimento é dominado por grandes empresas como Votorantim Cimentos, InterCement, CSN Cimentos, Nassau, Mizu, Nacional, Tupi, Ciplan e Itambé. Essas empresas estão distribuídas pelo território brasileiro, com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul, onde estão localizadas as maiores plantas industriais e os maiores mercados consumidores. No entanto, algumas, como Nassau e Mizu, têm atuação expressiva no Nordeste, atendendo à demanda local (**Figura 6**).

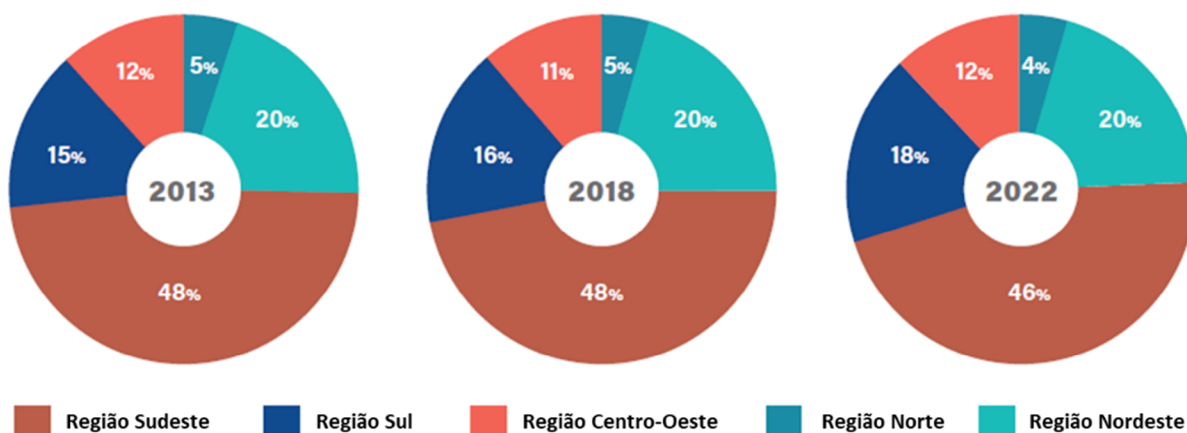
Figura 6 - Distribuição das plantas de produção de cimento no território nacional



Fonte: SNIC (2022).

Segundo dados do SNIC (2022), a distribuição da produção de cimento, no Brasil, é bastante concentrada na região Sudeste, que respondeu por 46% da produção em 2022, seguida pelas regiões Nordeste (20%), Sul (18%), Centro-Oeste (12%) e Norte (4%) (**Figura 7**). Essa distribuição geográfica impacta significativamente o transporte do cimento, visto que as regiões de menor produção dependem de longos trajetos rodoviários para suprir a demanda, o que eleva os custos logísticos e as emissões de carbono. Assim, o método de transporte do cimento para os grandes centros consumidores deve ser um ponto de atenção para investimento e melhoria no caminho para uma fabricação e consumo de cimento com menor impacto ambiental.

Figura 7 - Participação regional na produção de cimento nacional



Fonte: SNIC (2022).

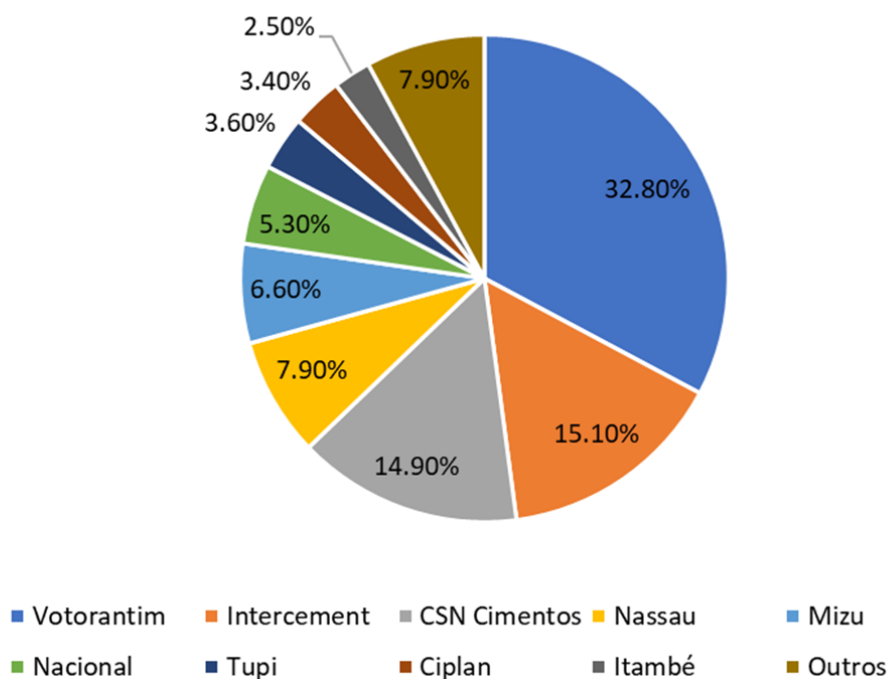
A **Figura 8** mostra o percentual de mercado dominado por cada uma dessas empresas, destacando a liderança de Votorantim e InterCement, seguidas pela CSN Cimentos que, em 2022, fez a aquisição das plantas da Lafarge Holcim no Brasil e está em negociação para a aquisição dos ativos das InterCement.

Entre os nove principais fabricantes de cimento do Brasil, 44% dessas empresas podem ser consideradas de grande porte (Votorantim, Intercement e CSN Cimentos e Mizu), enquanto 56% são de médio porte (Nassau, Nacional, Tupi, Ciplan e Itambé).

De acordo com o Relatório Anual de 2022 (SNIC, 2022), o consumo aparente de cimento nacional tem sofrido variações ao longo dos últimos anos. Em 2022, o consumo aparente foi de 62,7 milhões de toneladas, uma retração de 2,7% em comparação com 2021.

Desde o auge de 71,9 milhões de toneladas em 2014, o setor passou por períodos de crise, especialmente entre 2015 e 2018, e, apesar da recuperação parcial entre 2019 e 2021, ainda enfrenta desafios. O consumo per capita de cimento no Brasil, em 2022, foi de 292 kg por habitante, inferior à média mundial, que gira em torno de 500 kg/habitante.

Figura 8 - Percentual de mercado de cimento brasileiro por produtora

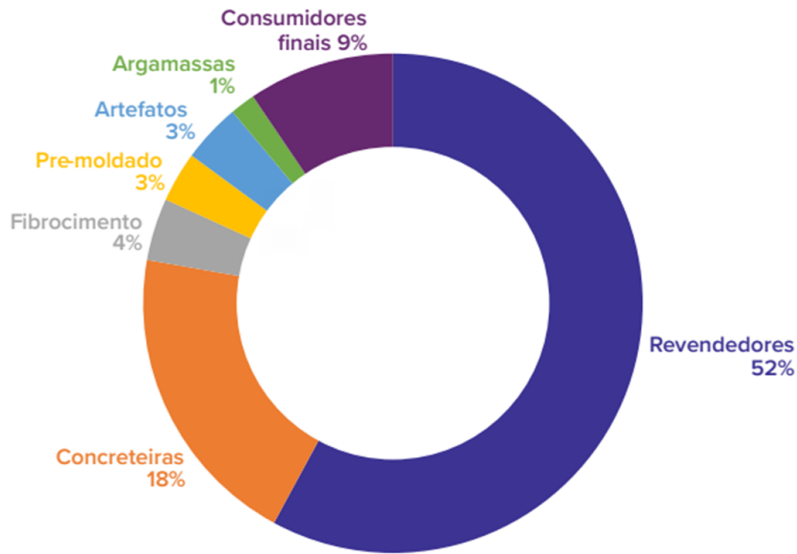


Fonte: Cimento.Org (2022).

Esses dados mostram que existe uma tendência para o consumo nacional continuar a crescer nos próximos anos principalmente devido à elevada demanda por moradia no país. Esses dados ressaltam, mais uma vez, a necessidade da tomada de ações e implementação de políticas públicas que incentivem a descarbonização do setor, uma vez que a produção deve continuar crescendo nos próximos anos

Em termos da participação de mercado, a divisão no Brasil ocorre conforme a **Figura 9**. A maior participação é dos revendedores, que representam mais de 50% da produção, principalmente para a produção de argamassa e concreto dosado em obra. Em torno de 18% são utilizados em usinas de concreto para produção de concreto pré-moldado. Aproximadamente 12% são voltados para produtos e artefatos mais industrializados, como fibrocimento, pré-moldados e argamassas industrializadas. Finalmente, cerca de 0,2% são representados pela importação (Reis *et al.*, 2023).

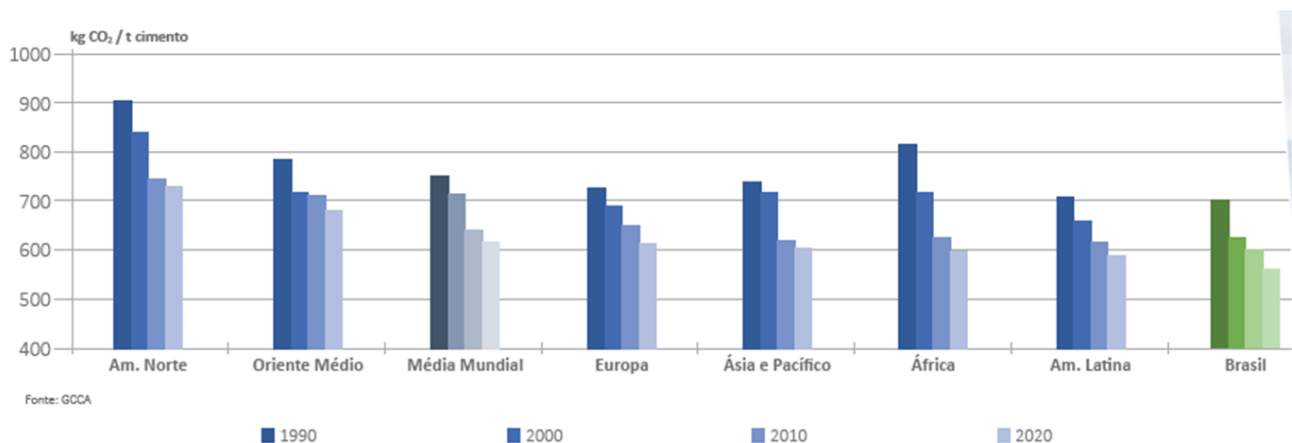
Figura 9 – Distribuição do cimento por diferentes mercados em 2021



Fonte: Reis et al. (2023).

O indicador de intensidade de carbono da cadeia produtiva é uma métrica fundamental que quantifica as emissões de CO₂ por tonelada de cimento produzido. Este indicador é crucial para a avaliação do impacto ambiental ligada à mudança climática do processo produtivo e na formulação de estratégias e políticas destinadas à redução das emissões de GEE.

Figura 10 – Intensidade de emissão de CO₂ na produção do cimento



Nota: (*) 2020 – emissões projetadas.

Fonte: Visedo e Pecchio (2019).

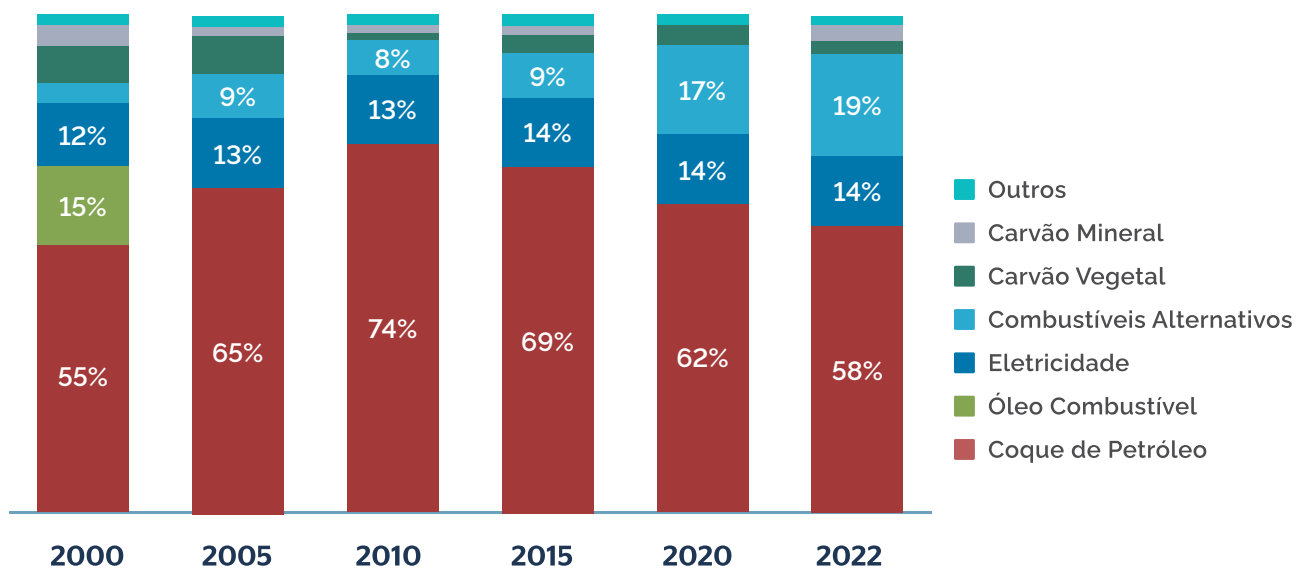
Em termos de emissões de CO₂ por tonelada de cimento produzido, o Brasil tem sido um referencial em baixas emissões desde o início de sua contabilização, em 1990 (Figura 10). Conforme o *Roadmap* Tecnológico do Cimento de 2019, a média de emissões de CO₂ na

produção de cimento no Brasil era de 565 kg de CO₂ por tonelada, em contraste com a média mundial de 620 kg de CO₂ por tonelada (Visedo; Pecchio, 2019). Esse desempenho posiciona o Brasil entre os países com os menores índices de intensidade carbônica na produção de cimento.

O melhor desempenho brasileiro pode ser atribuído ao seu parque industrial mais novo e moderno em comparação aos países europeus e norte-americanos, à maior participação de combustíveis alternativos (ex. resíduos e biomassa) e à considerável participação de adições minerais em substituição ao clínquer, principalmente de escórias de alto-forno. A matriz de energia elétrica brasileira, que em 2023 chegou a mais de 90% de participação de fontes renováveis, também ajuda a explicar esse elevado desempenho.

Em 2019, o *Roadmap* Tecnológico do Cimento Brasileiro (Visedo; Pecchio, 2019) apresentou a diminuição da participação do coque de petróleo na produção de cimento e o aumento de combustíveis alternativos e eletricidade. Essa tendência tem se mantido de acordo com dados levantados pela IEA (2023), sobre a participação das diferentes fontes de energia no consumo energético da indústria de cimento brasileira, conforme apresentado na **Figura 11**.

Figura 11 – Consumo final de energia por fonte na indústria de cimento brasileira



Fonte: IEA (2023).

Dado que o Brasil já possui uma matriz energética consideravelmente limpa e renovável, os desafios para melhorias adicionais nessa matriz são significativos. Portanto, é imperativo que sejam exploradas e incentivadas outras alternativas para a redução das emissões de CO₂ na indústria brasileira do cimento. Entre elas, destacam-se a substituição parcial do clínquer e o aumento da utilização de adições, que são cruciais para alcançar uma produção mais sustentável e reduzir ainda mais a intensidade de carbono no setor cimenteiro.

3.2. Influência de setores (*downstream* e *upstream*) nas emissões de carbono da cadeia produtiva de cimento

A cadeia produtiva do cimento é extensa, envolvendo diversas etapas que influenciam diretamente as emissões de carbono e o impacto ambiental da produção do cimento. As emissões de CO₂ não têm origem exclusivamente do processo produtivo do cimento dentro das fábricas, sendo necessário considerar as emissões oriundas de diversas atividades dos chamados setores *upstream* e *downstream*. Esses setores apresentam um elevado impacto no perfil de emissões de carbono da indústria cimenteira, tanto pela demanda energética quanto pela produção e o transporte dos materiais utilizados em todo o processo. O termo "*upstream*" faz referência a todas as atividades que ocorrem antes da produção do cimento em si, incluindo extração, processamento e transporte de matérias-primas. Já o termo "*downstream*" refere-se às etapas de distribuição, aplicação do cimento em obras de construção civil e demolição, bem como o ciclo de vida dos produtos à base de cimento.

O processo produtivo do cimento tem início com a extração de matérias-primas como calcário, argila, minério de ferro e gipsita. Segundo dados da Agência Nacional de Mineração, no ano de 2023, foram produzidas 21,9 Mt de ferro, 32,8 Mt de calcário e 1,47 Mt de gipsita (ANM, 2023). O processo de extração dessas matérias-primas é uma atividade intensiva em energia e recursos, realizado, principalmente, através de mineração a céu aberto. Durante o processo de mineração, existem diversas etapas, tendo cada uma delas aspectos ambientais e emissão de CO₂ associados, conforme ilustrado na **Figura 12**.

Figura 12 – Operações e fontes de emissão de GEE do setor mineral

ETAPAS	ATIVIDADE	CATEGORIA DE EMISSÃO
Decapeamento e abertura de frente da lavra	<ul style="list-style-type: none"> Remoção de corbetura vegetal para atingir a rocha e etapa de perfuração 	<ul style="list-style-type: none"> Mudança de uso do solo Combustão estacionária e móvel (uso de veículos pesados)
Extração	<ul style="list-style-type: none"> Detonação para extração de minerais; Escavação e transporte 	<ul style="list-style-type: none"> Combustão estacionária e móvel (maquinas de escavação e caminhões) Consumo de energia elétrica
Beneficiamento	<ul style="list-style-type: none"> Tratamento do ROM; Conjunto de processos para separação e obtenção do concentrado 	<ul style="list-style-type: none"> Combustão estacionária Consumo de energia elétrica (fragmentação, moagem, concentração)
Movimentação de máquinas e transporte interno	<ul style="list-style-type: none"> Maquinário de apoio para beneficiamento e transporte do minério concentrado 	<ul style="list-style-type: none"> Combustão estacionária e móvel Uso de combustíveis Consumo de energia elétrica
Recuperação de áreas abertas	<ul style="list-style-type: none"> Conjunto de operações necessárias para descontinuação da mina 	<ul style="list-style-type: none"> Uso de combustíveis Consumo de energia elétrica
Encerramento dessas áreas		

Fonte: IBRAM (2024).

No Brasil, o procedimento de extração em si se dá, majoritariamente, através do uso de explosivos para quebrar grandes partes de rocha, seguido pela remoção e transporte do material com utilização de escavadeiras e caminhões de grande porte. Segundo o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor Mineral 2024, publicado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2024), 59% das emissões de GEEs do setor são provenientes da combustão móvel. Essa combustão se refere às emissões de GEE geradas pela queima de combustíveis em equipamentos e veículos que são utilizados para produzir movimento e percorrer trajetos. Isso inclui maquinário como escavadeiras, caminhões e outros veículos de transporte que operam nas atividades de mineração e dependem amplamente de combustíveis fósseis como o diesel.

Após o transporte, as matérias-primas passam por um processamento preliminar nas plantas de fabricação de cimento, com etapas de trituração, moagem, homogeneização, entre outras. Por demandarem consumo de energia, todas essas etapas acabam por impactar nas emissões de GEEs *upstream* do cimento, uma vez que a energia consumida pode vir de fontes renováveis ou não-renováveis.

Com o término do processo de produção, o cimento e seus subprodutos passam para a etapa de aplicação, onde o transporte novamente se torna uma fonte significativa de emissões de CO₂, dada a dependência brasileira do transporte rodoviário. A distribuição do cimento envolve a utilização de caminhões que percorrem longas distâncias, aumentando assim a pegada de carbono da cadeia produtiva. A otimização logística e a adoção de meios de transporte mais sustentáveis, como ferrovias e hidrovias, são estratégias que poderiam mitigar essas emissões.

3.3. Tendências atuais e futuras nas cadeias produtivas de cimento no Brasil

Uma das principais tendências na cadeia produtiva do cimento no Brasil é a diminuição do consumo térmico, o aumento do uso de combustíveis alternativos com menor impacto ambiental e a redução do consumo de clínquer. Entre 1990 e 2014, o Brasil conseguiu reduzir em 17% o consumo térmico, aumentar em 14% o uso de combustíveis alternativos e elevar em 13% a incorporação de substitutos do clínquer (Visedo; Pecchio, 2019).

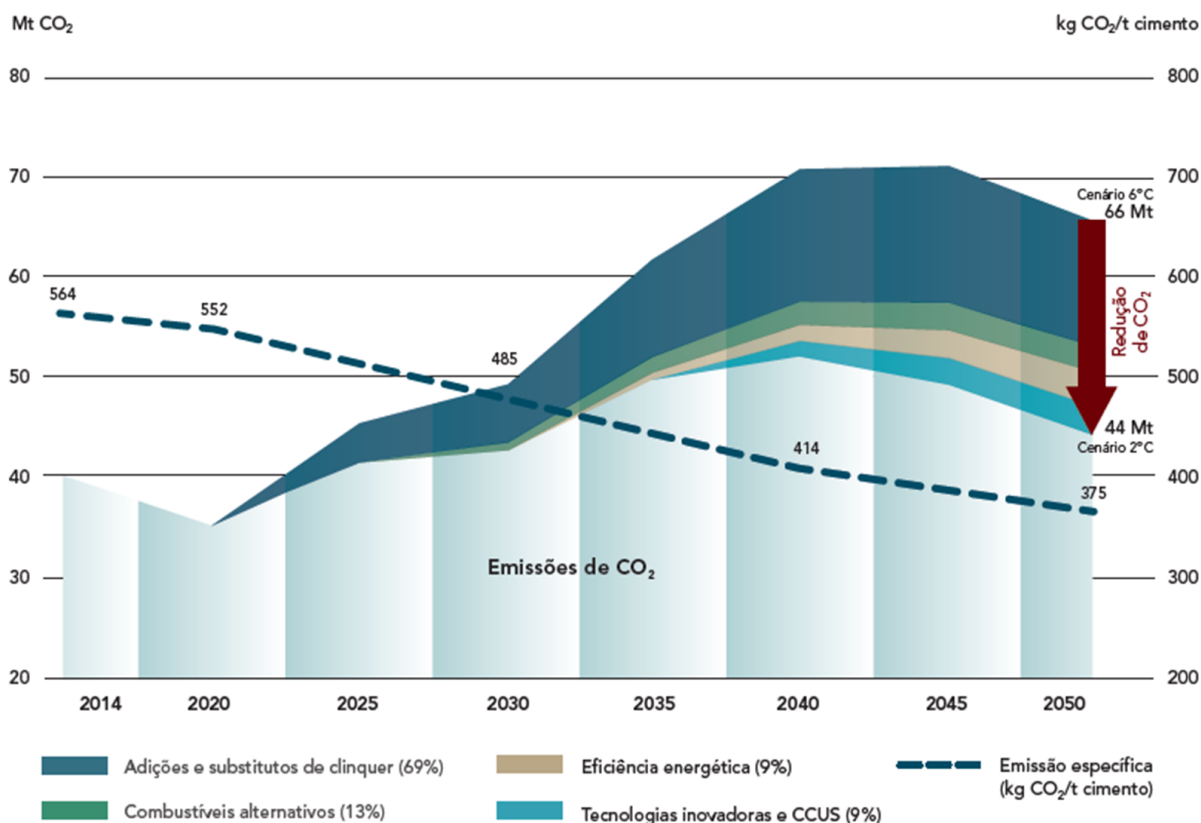
Dentre os combustíveis alternativos, o carvão vegetal representa a maior participação (40%), seguido pelos pneus inservíveis (22,4%), resíduos industriais (14,5%) e outros (serragem, resíduos oleosos, outras biomassas e etc.), segundo dados de 2016 (Visedo; Pecchio, 2019). Destaca-se também que a principal fonte de biomassa utilizada atualmente, a moinha de carvão vegetal (resíduos do carvão vegetal) proveniente de pequenas usinas de ferro gusa, ficará escassa já em 2030. Com isso, o setor precisará buscar outras fontes alternativas de biomassa, nos quais outros resíduos da agroindústria desempenharão um papel crucial. Resíduos sólidos urbanos e industriais não perigosos e lodos de esgoto também possuem um elevado potencial para serem empregados como combustíveis alternativos.

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) de 2023, mais de 99% da produção de cimento no Brasil utiliza fornos de processo seco, que são atualmente considerados os mais eficientes em termos

energéticos. Além disso, aproximadamente 40% do parque industrial brasileiro é composto por instalações relativamente novas, com menos de 15 anos de operação (EPE, 2021). Ademais, 80% dos fornos utilizados no país estão equipados com resfriadores de grelha modernos, que melhoram a eficiência térmica do processo. Aproximadamente 50% dos moinhos de matéria-prima são do tipo vertical, conhecidos por seu menor consumo de eletricidade em comparação com os moinhos tradicionais (EPE, 2023).

Continuar na direção de aumentar a incorporação de adições, juntamente com a redução do consumo de clínquer, é um dos principais caminhos para o Brasil mitigar ainda mais o impacto ambiental da indústria do cimento (Figura 13). De acordo com dados do SNIC (Visedo; Pecchio, 2019), se a proporção de clínquer no cimento for reduzida de 68% para 52%, é possível evitar a emissão de um total de 290 Mt de CO₂.

Figura 13 - Redução de emissões diretas de CO₂ por alternativa, comparando-se o “Cenário 2°C” com “Cenário 6°C”

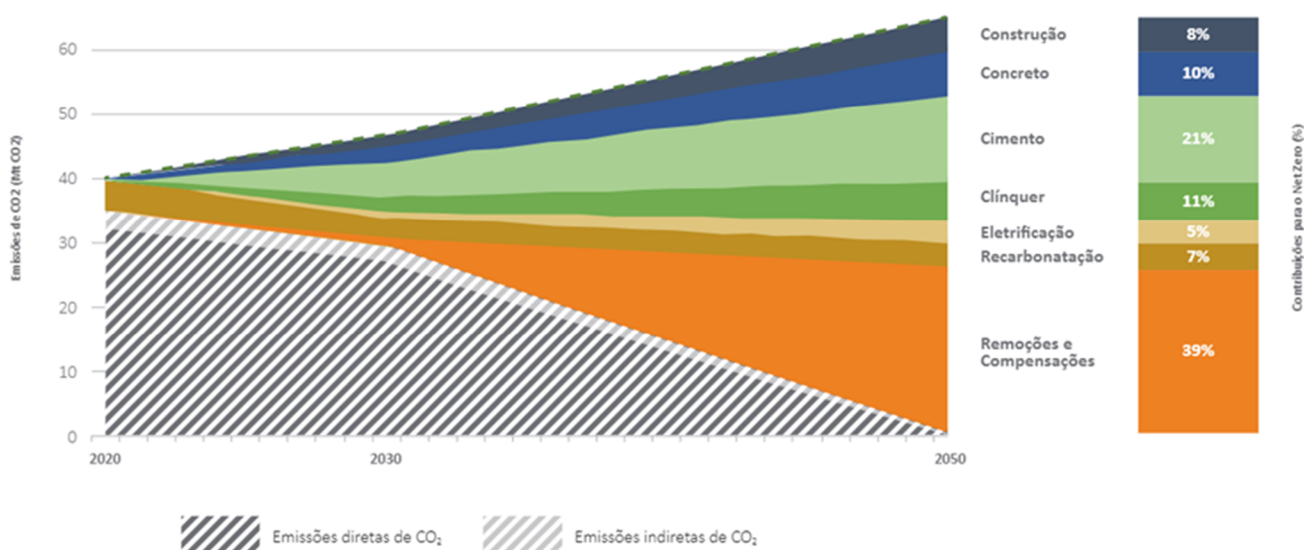


Fonte: Visedo e Pecchio (2019).

No entanto, com o aumento do uso de adições, a disponibilidade de cinzas volantes (provenientes das usinas à carvão mineral) e escórias provenientes do setor siderúrgico, que são atualmente as adições mais utilizadas no Brasil, tende a diminuir. Isso tornará indispensável a busca por novas adições e o aumento do uso de materiais já utilizados em menor escala, como o fíler calcário e as argilas calcinadas. Outras potenciais cinzas, as chamadas biocinzas (por exemplo, aquelas provenientes da casca de arroz bagaço de cana) podem desempenhar um papel muito importante dada suas propriedades técnicas já comprovadas (Cordeiro *et al.*, 2012; Fairbairn *et al.*, 2012), certa disponibilidade e pelo fato de serem obtidas de fontes renováveis, podendo estimular uma bioeconomia. Soluções locais, como cinzas obtidas do caroço do açaí (Rocha *et al.*, 2022) também podem ter um papel importante.

Em 2022, a ABCP e o SNIC aderiram ao compromisso de neutralidade de carbono do cimento e concreto até 2050 junto à *Global Cement and Concrete Association (GCCA)*. O “Roadmap Net Zero – Brasil” apresenta as diretrizes estratégicas para a trajetória Net Zero, conforme mostra a **Figura 14**, aumentando o escopo de avaliação (considerando uma fronteira além das fábricas de cimento).

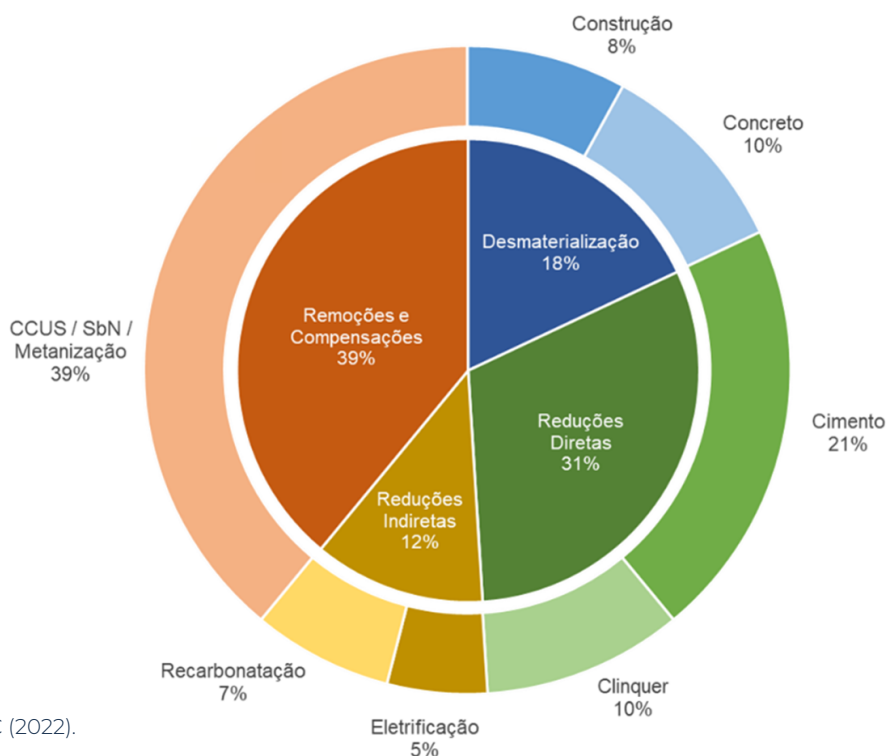
Figura 14 - Trajetória Net Zero no cimento brasileiro até 2050



Fonte: ABCP e SNIC (2022).

Entre essas há quatro grandes estratégias cujos percentuais de redução são apresentados na **Figura 15**. São elas: desmaterialização; reduções diretas; reduções indiretas; e remoções e compensações.

Figura 15 – Estratégias da Trajetória Net Zero: Brasil até 2050



Fonte: ABCP e SNIC (2022).

A desmaterialização deve contribuir com 18% da redução de CO₂, dos quais 8% devem ser atingidos por otimização do projeto e da construção e 10% por meio da maior eficiência na produção de concretos, aumentando a industrialização, como forma de reduzir o desperdício e melhorar o controle de qualidade (Visedo; Pecchio, 2019; ABCP; SNIC, 2022). Para a redução das emissões diretas do setor, que representará 31% da contribuição para “net-zero”, estima-se que seja possível reduzir 21% das emissões do cimento por meio da redução do fator de clínquer, ampliando as adições no cimento de fíler calcário e argila calcinadas, além de escórias e cinzas volantes. Melhorias na produção do clínquer poderão contribuir com uma redução de 10%, principalmente, por meio da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos de menor intensidade de carbono, como resíduos industriais, agroindustriais e urbanos e, a longo prazo, o hidrogênio verde.

A eletrificação e a recarbonatação são as alternativas para redução indiretas, que representam 12% da trajetória net-zero brasileira. Estima-se que 5% das reduções virão da eletrificação do setor com uso de energias renováveis e por redução do consumo elétrico das plantas por meio de automação de processos, inteligência artificial e recuperação

de calor residual para cogeração elétrica. O segmento aposta no reconhecimento científico do potencial de abatimento de emissões por recarbonatação das estruturas de cimento e concreto ao longo do seu ciclo de vida, considerando assim que 7% redução virá das emissões da recarbonatação (Visedo; Pecchio, 2019; ABCP; SNIC, 2022).

Por fim, 39% das reduções deverão vir de projetos remoção e compensação de CO₂, nos quais se contabilizam as remoções proveniente de captura, uso ou estocagem de carbono, emissões evitadas pelo coprocessamento de resíduos em fornos de cimento que potencialmente gerariam metano quando decompostos em aterros e ainda projetos de remoções de carbono a partir de Soluções baseadas na Natureza (SbN) que incluem projetos de conservação florestal (Visedo; Pecchio, 2019; ABCP; SNIC, 2022).

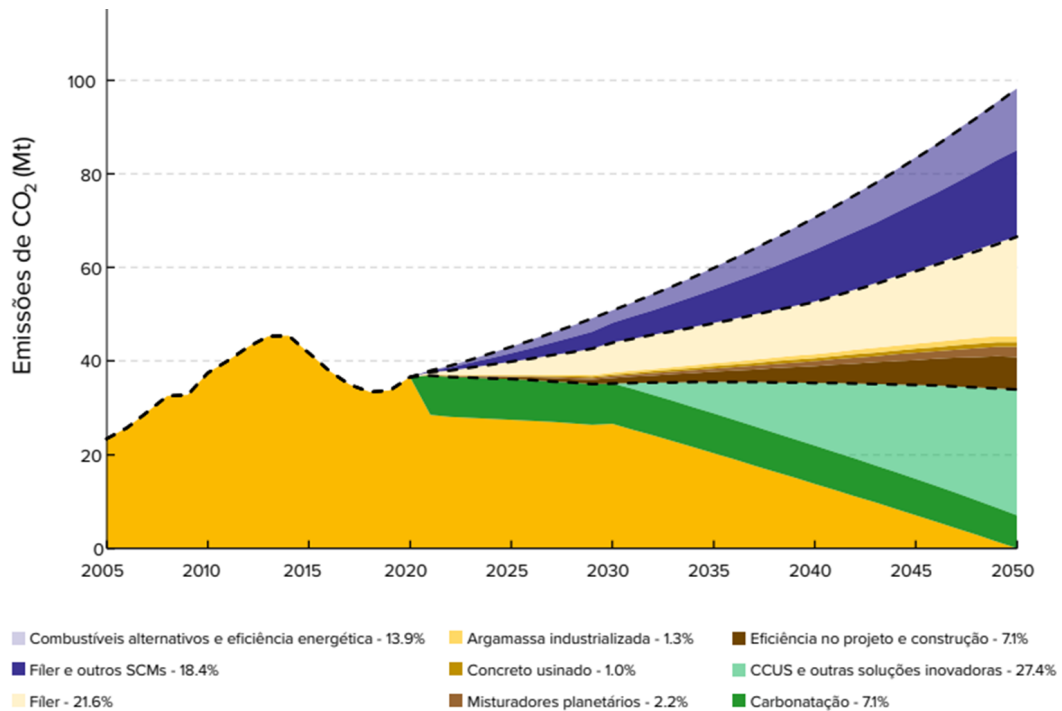
Palermo *et al.* (2022) analisaram diferentes cenários para a redução de emissões de CO₂ na produção de cimento no Brasil. O estudo mostrou que as combinações com taxas mais altas de substituição de combustível fóssil e menores proporções de clínquer-cimento resultam em menores impactos ambientais em todas as categorias analisadas. Além disso, os resultados indicam que o tipo de combustível alternativo empregado, seja com base em resíduos de combustíveis fósseis ou seja com base em renováveis, não tem influência significativa nas reduções quando comparado aos benefícios da substituição de combustíveis fósseis em si.

Pesquisa realizada por Reis *et al.* (2023) vai um pouco além e avalia outras estratégias, como o emprego da argamassa industrializada, conforme é apresentado na **Figura 16**. Alguns resultados encontrados se diferem do estudo realizado pela ABCP e SNIC (2022), como por exemplo: cimento (36% x 53,9%), concreto (10% x 3,3%) e remoções e compensações (39% x 34,5%). Essas diferenças podem ser explicadas principalmente por diferenças metodológicas e premissas adotadas na modelagem.

O estudo ressalta que, além das soluções tecnológicas avaliadas, a precificação do carbono emerge como uma estratégia fundamental e que o futuro dessa indústria no Brasil, para atingir a neutralidade de carbono até 2050, deverá passar obrigatoriamente pela integração de inovações tecnológicas, revisão normativa e instrumentos econômicos (Reis *et al.*, 2023).

O emprego de metodologias de avaliação ambiental como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e publicação das Declarações Ambientais de Produto (DAPs) também são essenciais para a medição, avaliação e melhoria de todo o processo de produção do cimento e identificação de possíveis *trade-offs* entre diferentes impactos ambientais (Caldas *et al.*, 2020)

Figura 16 – Estratégias adotadas no estudo para atingir a neutralidade de carbono até 2050



Fonte: Reis *et al.* (2023).

3.4. Mapeamento das práticas ambientais e de inovação da indústria nacional

O mapeamento das práticas ambientais e de inovação na indústria nacional de cimento é fundamental para entender como o setor está se adaptando às demandas por sustentabilidade e redução de emissões de carbono. Como dito anteriormente, a indústria nacional tem feito avanços na adoção de práticas que visam minimizar seus impactos ambientais.

Uma maneira de alcançar essas reduções, citada anteriormente, é o aumento do teor de fíler não apenas na composição do cimento, mas também na formulação de argamassas e concretos. Essa alteração não apenas reduz a quantidade de clínquer utilizada, mas também aumenta a taxa de carbonatação, promovendo um maior sequestro de CO₂ da atmosfera. O primeiro cenário avaliado por Reis *et al.* (2021) sugere uma redução de 17% do teor de clínquer até 2050, alinhando-se a recomendações do SNIC, ABCP e da IEA. Adicionalmente, o estudo destaca que o aumento do uso de combustíveis alternativos e biomassa, de 15% para 55% até 2050, representa uma mudança significativa na matriz energética da indústria de cimento. Isso, juntamente com a redução do consumo de energia térmica de 3,5 para 3,2 GJ/t de clínquer e de 77 para 64 kWh/t para eletricidade, são medidas que contribuem para a diminuição das emissões de GEE.

O segundo cenário avaliado por Reis *et al.* (2021) introduz quatro alternativas para melhorar a eficiência material na construção civil, destacando que o concreto pré-fabricado pode consumir até 20% menos cimento que o concreto misturado no local, devido a um melhor conhecimento técnico, controle na produção e ao uso de aditivos químicos. De acordo com os resultados encontrados, a implementação dessas estratégias poderia reduzir as emissões de CO₂ em até 56% até 2050, conforme os cenários combinados de baixo carbono, resultando em uma redução acumulada de 590 milhões de toneladas de CO₂ (Reis *et al.*, 2021).

A seguir é apresentado um resumo (**Tabela 1**) de diferentes ações das principais empresas cimenteiras brasileiras e as Curva de Custo Marginal de Abatimento (Curva MACC), a partir da qual é possível visualizar quais são as iniciativas que apresentam melhor relação de custo-efetividade para a descarbonização da empresa, conforme é apresentado na **Figura 17**. Essas informações foram retiradas das páginas das empresas pesquisadas. Nas curvas MACCs é possível observar que o CCU/CCUS apresenta um elevado custo de abatimento (em U\$/tonelada de CO₂) e é apresentado somente para a empresa Votorantim. É importante ressaltar que essas curvas se atualizam de forma frequente e, assim, não se deve realizar comparação direta entre as diferentes empresas.

Tabela 1 – Resumo de diferentes ações das principais empresas cimenteiras brasileiras

AÇÕES	EMPRESAS		
	VOTORANTIM CIMENTOS	INTERCEMENT	CSN CIMENTOS
Substituição do clínquer e uso de materiais cimentícios alternativos.	Parte do clínquer é substituído por subprodutos de outras indústrias, como escórias siderúrgicas e cinzas de termoelétricas. Além disso, a empresa emprega outros materiais cimentícios, como argila calcinada e pozolana natural.	Não foi encontrado menção ou registro.	Redução do fator clínquer/cimento, mas sem detalhar.
Substituição de combustíveis fósseis	O pilar de coprocessamento foca na substituição do combustível fóssil tradicional nos fornos de produção de cimento por combustíveis alternativos, como biomassas e diversos tipos de resíduos.	Promove o coprocessamento em todas as suas unidades operacionais, não apenas no Brasil, mas também em outros países onde atua. Envolve o uso de biomassa para aquecer os fornos das fábricas, substituindo produtos químicos e combustíveis fósseis.	Registra o uso de combustíveis alternativos e biomassa. Houve o início do coprocessamento na planta de Arcos (MG), que permitiu a redução 50 kg CO ₂ /ton de cimento na unidade, onde também houve o acréscimo do uso de biomassa, atingindo 15%.
Eficiência energética e térmica.	A empresa se concentra na otimização dos processos produtivos e no uso de fontes renováveis de energia, além de investir em melhorias na eficiência térmica e elétrica de suas fábricas.	Não foi encontrado menção ou registro.	A recuperação de calor para produção de energia elétrica é a alternativa com melhor custo de abatimento, porém de um potencial de redução limitado. As iniciativas de maior potencial de emissão evitadas são a utilização de carvão vegetal como fonte térmica.

AÇÕES	EMPRESAS		
	VOTORANTIM CIMENTOS	INTERCEMENT	CSN CIMENTOS
CCS/CCUS	Aparece como solução futura.	Não foi encontrado menção ou registro.	Aparece como solução futura.
Inovação	O pilar das novas tecnologias abrange o uso de processos inovadores e novos materiais, além de iniciativas de desmaterialização da cadeia de valor e captura, uso e sequestro de carbono. A Votorantim Cimentos lançou, por meio da Engemix, o Spectra, um concreto de alto desempenho com traço único que pode ser utilizado em toda a estrutura da obra, simplificando o processo de concretagem que permite a redução do uso de concreto e, consequentemente de cimento e de aço, permitindo uma redução de 15,7% das emissões de CO ₂ quando comparados a concretos convencionais e redução de custo total da estrutura de 3 a 4%.	A empresa implementou a biofixação de microalgas, um processo inovador que utiliza a fotossíntese e biorreatores para remover CO ₂ da atmosfera. Realizou parceria com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o desenvolvimento do LEAP (Low Emission Advanced Performance), um cimento verde projetado para reduzir o uso de ligantes e a demanda de água no concreto, mantendo um desempenho adequado. Nos testes, o LEAP demonstrou eficiência na redução de até 32% das emissões de GEE.	Não foi encontrado menção ou registro.
Curva de Custo Marginal de Abatimento (Curva MACC)	Sim, traçou sua curva.	Não foi encontrado menção ou registro.	Sim, traçou sua curva.
Meta de redução de emissão	A empresa possui uma meta de redução para 475 Kg CO ₂ / ton de cimento em 2030, uma redução de 24,8% em relação ao ano-base de 2018. É importante destacar que essa meta é aprovada pela Science Based Target Initiative (SBTi, 2024).	A empresa possui entre seus compromissos de sustentabilidade para 2030, estar entre os produtores de menor intensidade carbônica, com emissões abaixo de 500 kg de CO ₂ / ton de cimentícios.	Devido à aquisição dos ativos da Lafarge Holcim, a CSN Cimento reviu sua meta de emissões, de 28% para 23% de redução em relação ao ano base de 2020 (CSN, 2024). Ainda assim, esta nova meta, aprovada pela SBTi, está alinhado com os objetivos de curto prazo para o alcance do 1,5°C do Acordo de Paris. Deve reduzir de 519 kg de CO ₂ / ton de cimento, em 2020 para 392 de kg CO ₂ / ton de cimento em 2030.
Outras ações	Adota um Sistema de Gestão Ambiental (SGA). A Votorantim é a única fabricante nacional que possui a Declaração Ambiental de Produto (<i>Environmental Product Declaration – EPD</i>). A empresa definiu um preço interno de carbono para o planejamento estratégico de seus investimentos, de forma a avaliar a atratividade financeira de todos os seus projetos, independente do estágio de regulamentação do carbono no país.	A empresa atua de forma integrada na gestão de recursos hídricos, de resíduos e na redução das emissões de GEEs, em linha com sua Política de Alterações Climáticas & Energia. Dentre os projetos de economia circular, destacam-se projetos pequenos produtores rurais que fornecem resíduos de suas produções, como de baru, babaçu, licuri, açaí e palmito para o coprocessamento.	Produz relatórios de Ação Climática publicados anualmente.

Nota: Vale salientar que as empresas pesquisadas podem realizar alguma das ações avaliadas, mas que por algum motivo não foi encontrado o registro e, portanto, não estão contempladas na Tabela.

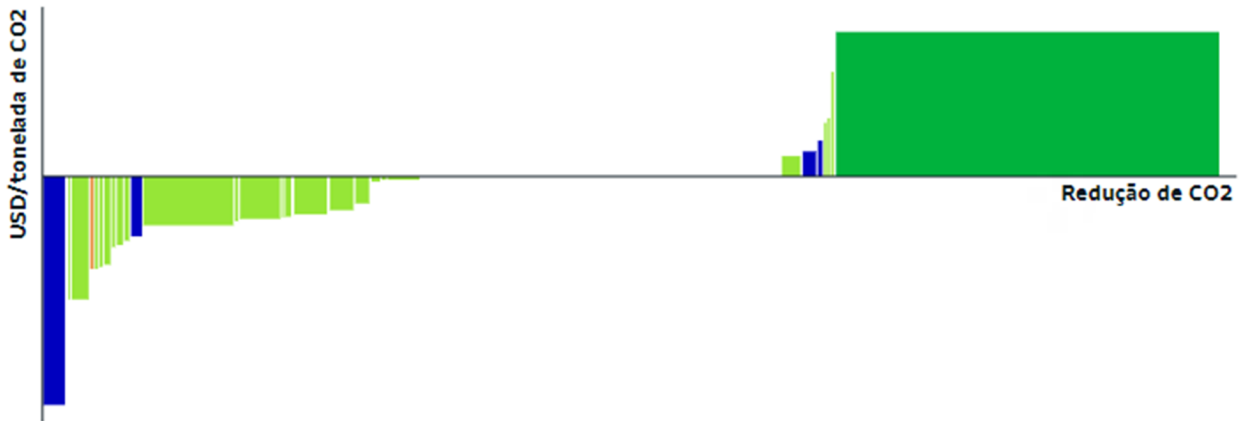
Fonte: Elaboração própria com base em Votorantim Cimentos (2023a, 2023b, 2023c, 2024a, 2024b), Engemix (2024), SBTi (2024), InterCement Brasil (2019; 2021, 2024) , CSN (2022, 2024a).

Figura 17 – Curva MACC de descarbonização: Votorantim Cimentos e CSN

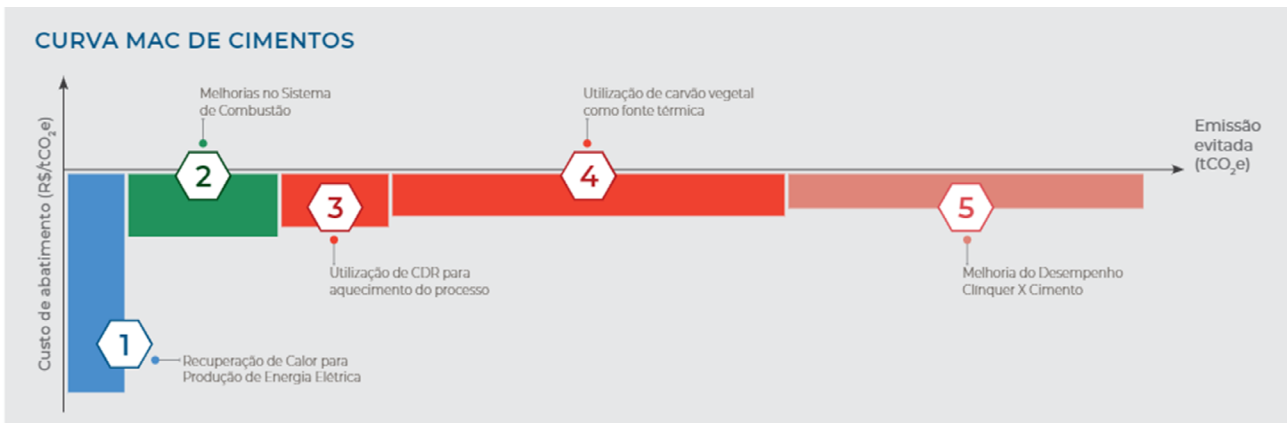
(a) Votorantim Cimentos

Curva MACC

● Substituição de combustíveis fósseis ● Cimentícios ● Consumo térmico ● CCS



(b) CSN



Fonte: Votorantim Cimentos (2024b, p. 26) e CSN (2022, p. 33).

3.5. Tecnologias potenciais para Brasil e países da América Latina

A tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono é uma das soluções mais promissoras para reduzir as emissões no setor de cimento, especialmente em grandes fontes emissoras. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019) o CCUS poderá contribuir com até 18% da redução global das emissões de CO₂ da indústria cimenteira até 2060, o que tem motivado empresas como a Holcim a incorporar essas tecnologias em suas operações. A aplicação do CCUS permite capturar CO₂ dire-

tamente nas fontes emissoras, possibilitando seu uso em processos industriais ou seu armazenamento seguro em formações geológicas, à medida que as tecnologias se tornam mais acessíveis. Esse avanço tem potencial para contribuir significativamente para as metas de sustentabilidade do setor (OGCI, 2024).

O processo de CCUS inclui a captura de CO₂ na fonte emissora, o transporte e o subsequente uso ou armazenamento do gás. Métodos como pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão são utilizados, mas, no contexto da produção de cimento, a captura por pré-combustão é menos aplicável, pois exigiria o uso de hidrogênio como combustível principal. Após a captura, o CO₂ deve ser transportado para locais adequados para sua utilização ou armazenamento, considerando fatores como volume e pureza, que afetam diretamente sua viabilidade econômica e operacional. Os custos das etapas de captura, separação, transporte e armazenamento geológico, bem como o monitoramento ambiental, são significativos e devem ser considerados no planejamento estratégico (OGCI, 2024; Visedo; Pecchio, 2019).

A captura de CO₂ por meio de algas representa uma abordagem alternativa promissora para o setor cimenteiro, explorando a eficiência fotossintética das algas, que produzem biomassa rapidamente e podem ser utilizadas como fonte de energia. Embora vantajoso por não competir com a produção de alimentos e exigir menos terra, o cultivo de algas requer água e apresenta desafios de custo, que atualmente são mais elevados em comparação com outras fontes renováveis (Visedo; Pecchio, 2019).

Estudos recentes, como os de Monteiro e Roussanaly (2022), analisam a viabilidade técnica e econômica das cadeias de CCUS no setor cimenteiro, com resultados que indicam uma capacidade de captura de 0,694 MtCO₂/ano. Devido ao consumo energético nos processos de captura, condicionamento e transporte, 0,504 MtCO₂ são efetivamente evitados, o que representa uma eficiência de 65%. O custo total para evitar essas emissões é de 114 €/t CO₂, reforçando a viabilidade econômica e a necessidade de fontes de energia renováveis para melhorar a eficiência.

Análise adicional realizada por Dávila, Sacchi e Pizzol (2023) indica que, para alcançar a neutralidade de carbono, é essencial o uso intensivo de biomassa e eletricidade descarbonizada. Nesse contexto, a tecnologia CCS poderia reduzir até 91% das emissões de GEE, enquanto o CCUS permite uma redução de até 88%, embora com maior consumo energético.

4. Análise da dimensão política

4.1. Mapeamento das mais relevantes políticas da cadeia produtiva de cimento no mundo

Busch *et al.* (2022) mostram, por meio de revisão de artigos científicos e relatórios técnicos, que há um consenso quanto às estratégias tecnológicas a serem utilizadas na descarbonização da cadeia produtiva do cimento, sendo as mesmas apresentadas anteriormente no presente documento. Esse consenso, no entanto, não é observado quando se trata da avaliação de custos e viabilidade econômica e das estratégias políticas, sendo necessário ainda o aprofundamento desses temas para implementação dessas tecnologias.

Quanto às barreiras econômicas, observa-se que há um alto custo de investimento para implementação das tecnologias e ainda há uma limitada demanda do mercado por produtos de baixo carbono nesse setor. A cadeia de fornecedores é considerada fragmentada, dificultando a coordenação dos *stakeholders* envolvidos para a incorporação de materiais mais eficientes, de resíduos na substituição de combustíveis fósseis e da CCUS (Busch *et al.*, 2022)

Ainda que haja o consenso sobre as tecnologias, existem barreiras técnicas para empregá-las como as diferenças de propriedades desses novos materiais, como materiais que apresentam baixa reatividade, aumentando o tempo de cura e, conseqüentemente, a duração da obra. A necessidade de treinamento para o uso adequado desses materiais também é reconhecida como um desafio (Busch *et al.*, 2022). Adicionalmente, a normatização é tida como uma barreira regulatória visto que as normas dessa cadeia produtiva, como código de edificações e normas de cimentos e concretos, são, em geral, prescritas e não de desempenho, o que dificulta a adoção de novos materiais.

Observa-se ainda que as políticas de inovação existentes ofertam pouco apoio ao escalamamento de novas tecnologias. A inovação no setor tende a ser de melhorias incrementais do que inovações disruptivas. O cimento apresenta peculiaridades que tornam a inovação mais desafiadora. Trata-se de um produto com baixo valor de mercado, sendo considerado um produto barato, que possui propriedades únicas de difícil replicabilidade pelas alternativas economicamente competitivas (Rinzler, 2024).

Ressalta-se ainda a indústria do cimento mundial está concentrada em poucas grandes empresas com diversas plantas industriais, de modo que as mudanças significativas do setor passam pelos valores, as estratégias e os compromissos assumidos por essas empresas (Norster, 2023).

Busch *et al.* (2022) identificaram que as políticas mais comuns para os mecanismos de mercado são a taxação para a internalização de externalidades (Taxa Pigouviana), mais especificamente: a precificação do carbono, o subsídio para novas tecnologias, a eliminação de subsídios a combustíveis fósseis, o incentivo financeiro e o investimento em infraestrutura e desenvolvimento tecnológico. Novas regulamentações, por sua vez, podem estabelecer metas de redução e implementar medidas de comando e controle, incentivar de tecnologias de baixo carbono por meio de normas, fornecer diretrizes técnicas e estabelecer certificações. Somam-se a essas estratégias mecanismos informativos que visam educar e aumentar o conhecimento sobre essas tecnologias por meio de parcerias com governos e instituições acadêmicas, promovendo o desenvolvimento e a adoção de novas tecnologias.

Essas estratégias são corroboradas, por exemplo, pela GCCA (2024a, 2024b) que compreende que políticas públicas desempenham um papel central na capacidade da cadeia produtiva do cimento implementar as ações de descarbonização. A instituição sem fins lucrativos, que representa a indústria do cimento e do concreto globalmente, aponta para necessidade de um marco regulatório abrangente para que a produção de cimento de baixo carbono se torne um investimento atraente e se estimule a demanda por esse tipo de produto, além da criação da infraestrutura para a promoção de economia circular e emissões líquidas de carbono.

Do ponto de vista de tornar os investimentos atraentes, além do aumento da oferta de energias renováveis, a precificação do carbono é um dos pontos cruciais. Para tanto, é importante que os mecanismos a serem adotados criem condições equitativas em relação aos custos do carbono. O financiamento público também se faz necessário para apoiar pesquisas e desenvolvimento e a inovação no setor, reduzindo os riscos (GCCA, 2024b).

A normatização de cimentos e materiais de baixo carbono é fundamental para acelerar a adoção, que pode ser potencializada pelas compras públicas. Além da aquisição desses materiais para obras públicas, por meio de ação governamental, é possível estabelecer regulamentações e padrões de construção que induzam ou exijam esse consumo (GCCA, 2024a).

Quanto à promoção de economia circular, aponta-se para a priorização do uso e acesso aos resíduos e subprodutos, utilizados na substituição energética e de materiais, por meio de iniciativas na gestão de resíduos, tais como a proibição de destinação em aterro e a priorização do coprocessamento na hierarquia das políticas de gestão de resíduos sólidos, como forma de promover a recuperação energética e mineral e incentivar a simbiose industrial (GCCA, 2024a).

Outras medidas relevantes apontadas para a neutralidade de carbono no setor são ajustes nas metodologias de contabilidade de carbono para que se registre adequadamente os resultados das tecnologias de captura de carbono, como a absorção natural de CO₂ ao longo do ciclo de vida do concreto, por meio do processo de recarbonatação do material, considerando-o um sumidouro de CO₂ (GCCA, 2024a).

4.2. Análise da integração de fatores de inclusão social e transição energética nos instrumentos das políticas de descarbonização da cadeia produtiva do cimento

As ações de descarbonização das grandes empresas brasileiras do setor estão diretamente associadas às suas políticas de sustentabilidade e da agenda ESG (*environmental - social - governance*) e ao alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Embora parte das iniciativas de inclusão social não tenham uma relação direta com a redução das emissões de gases de efeito estufa, é preciso considerar que estes estão trabalhados dentro da mesma estrutura de governança dessas empresas.

No âmbito social, além dos compromissos com questões éticas, compliance e saúde e segurança ocupacional, observa-se a definição de metas relacionadas à promoção de um ambiente diverso e inclusivo. Isso inclui aumentar a diversidade de gênero na liderança e o envolvimento com a comunidade, por meio de ações de engajamento com as comunidades locais e iniciativas de voluntariado dos funcionários, além de favorecer a compra local como forma de incentivar a economia nas regiões onde as operações estão instaladas (Votorantim, 2024b).

A transição energética, por sua vez, está diretamente associada às estratégias de descarbonização dessa cadeia produtiva, especialmente no que diz respeito à substituição de combustíveis fósseis nos processos térmicos de produção de cimento, promovendo um aumento no uso de combustíveis alternativos e na eficiência energética. Outro aspecto da descarbonização do cimento, relacionado à transição energética, é a disponibilidade de cinzas provenientes da produção de energia, que podem ser de origem fóssil ou vegetal, como as biocinzas, dependendo das políticas energéticas a serem implementadas no país.

Além dos fatores inerentes ao processo, é crucial reconhecer a relevância do cimento e do concreto para a sociedade, especialmente diante dos desafios sociais e climáticos nas cidades. Esses materiais são fundamentais para a construção de infraestrutura e habitação, sendo essencial considerar as sinergias e os *trade-offs* das iniciativas de descarbonização.

No Brasil, programas governamentais, como o Novo PAC e o Minha Casa Minha Vida, são de grande importância para o desenvolvimento social do país e podem ser indutores do financiamento das ações de descarbonização da indústria de cimento (CNI, 2023). A regulamentação das estratégias econômicas para a descarbonização, como a taxaço de carbono, deve ser alinhada aos desafios sociais enfrentados pelas cidades brasileiras. Iniciativas previstas no Plano de Transição Energética (Brasil, 2024a), como a redução da alíquota para cimentos de baixa emissão de GEE, são importantes para viabilizar a descarbonização, mitigando os impactos econômicos e sociais de possíveis aumentos nos custos desses materiais de construção.

4.3. Levantamento das iniciativas no Brasil e suas barreiras

Apesar de iniciativas, a política industrial brasileira ainda não tem uma trajetória bem consolidada para a descarbonização. Parte disso está associado ao amplo foco da política climática brasileira na redução de emissões de GEE dos setores de agricultura e uso da terra, mudança do uso da terra e florestas, principais emissores do país. Com isso, o país não possui em sua NDC um detalhamento das metas a serem atingidas pelo setor industrial como um todo, incluindo a cadeia de cimento, o que dificulta o desenho de estratégias e de governança para a descarbonização (CNI, 2024).

Conforme discutido, à indústria de cimento nacional encontra-se em um patamar favorável em comparação a outros países, com indicadores de carbono devido à eficiência energética de suas plantas, a matriz energética brasileira, assim como à substituição de clínquer. Para avançar na descarbonização, será necessário não apenas superar limites técnicos, normativos, logísticos que possibilitem o desenvolvimento de novas tecnologias de adições, mas também estruturar e viabilizar a entrada de fornecedores de insumo e subprodutos nessa cadeia produtiva.

Nesse sentido, é fundamental que as políticas públicas forneçam os incentivos necessários. Atualmente, observa-se que as iniciativas que podem contribuir para as metas de redução de carbono da indústria cimenteira ainda estão espalhadas ao longo do setor da construção e podem não chegar diretamente às indústrias cimenteiras e aos outros atores envolvidos.

No Plano de Transição Ecológica (Brasil, 2024a), liderado pelo Ministério da Fazenda, há a previsão de medidas econômicas para a descarbonização do setor de construção civil, por meio da redução da alíquota para substitutos do clínquer menos intensivos em emissões de GEE na fabricação do cimento, bem como para apoio às indústrias associa-

das às inovações na fabricação do cimento, como o cimento geopolimérico ou aqueles produzidos a partir da reciclagem (CNI, 2023).

O Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) lidera o Plano de Ação para a Neoindustrialização (2024-2024), no qual o governo tinha como meta para final de 2024, operacionalizar a calculadora de pegada de CO₂ para obras públicas como instrumento de contratações públicas para alavancar o desenvolvimento da “Missão 3 – Infraestrutura, saneamento, moradia e mobilidade sustentável para a integração produtiva e o bem-estar nas cidades”. O Ministério também é responsável pelo Projeto Construa Brasil que objetiva melhorar o ambiente de negócio do setor da construção por meio de incentivos a modernização, principalmente pela difusão do *Building Information Modeling* (BIM) no Brasil, o incentivo à coordenação modular e à construção industrializada (Brasil, 2024b, 2024c).

No âmbito do Ministério das Cidades (MCID), existe o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) e na sua estrutura existe o Sistema de Qualificação de Empresas de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC) que tem por objetivo avaliar a conformidade de diferentes empresas/fabricantes de materiais de construção, dentre eles o setor de cimentos. No entanto, tanto o PBQP-H como o SiMaC, ainda não possuem relação direta com objetivos ligados à descarbonização dos materiais (Brasil, 2024d). Dentro do mesmo programa, existe o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais (SiNAT) que tem como objetivo principal avaliar produtos inovadores utilizados nos processos de construção que ainda não possuem normas técnicas estabelecidas pela ABNT, a partir da avaliação de conformidade e desempenho. O mesmo ministério apoiou a criação de uma ferramenta de cálculo de carbono e energia incorporada para obras de edificações brasileiras, chamado CECarbon, que é importante para se ter uma avaliação de toda a cadeia.

O Ministério de Minas e Energia (MME), por sua vez, coordenou o desenvolvimento de uma plataforma de mensuração da emissão de carbono e energia incorporada de materiais de construção, com base na metodologia de ACV, o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). O objetivo desse sistema é disponibilizar uma base de dados ambientais com diferentes de materiais de construção, especialmente os diferentes tipos de cimento, concreto e outros materiais cimentícios utilizados no Brasil (Brasil, 2024e). No futuro, além de dados médios ou genéricos, espera-se que os fabricantes disponibilizem seus dados, possibilitando a escolha daqueles que possuam o melhor desempenho ambiental (especialmente em termos de carbono).

No âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) está em fase de lançamento um projeto voltado para edifícios *net-zero carbon*. O projeto é organizado em quatro componentes: (i) a construção e adoção de um *roadmap* em conjunto com os governos federal, estaduais e municipais, com regulamentações que aumentem a coerência das políticas e fortaleçam os ecossistemas de inovação para acelerar a expansão de edifícios net-zero; (ii) previsão que os principais atores nacionais, gestores e financiadores públicos em todos os níveis, além da iniciativa privada e da sociedade civil, obterão evidências e dados sobre a viabilidade social, econômica e ambiental de construções net-zero; (iii) fortalecimento de instrumentos inovadores de financiamento para expansão e garantia de investimento de longo prazo em edifícios de baixa emissão e net-zero; e (iv) desenvolvimento de uma plataforma de conhecimento para o compartilhamento das experiências para difundir as boas práticas e lições aprendidas (Brasil, 2023).

Em tramitação o projeto lei nº 1.874/2022, de autoria da Comissão de Meio Ambiente (CMA) do Senado Federal, pretende criar a Política Nacional de Economia Circular, com o objetivo de estimular o uso mais consciente dos recursos e priorizar produtos mais duráveis, recicláveis e renováveis (Brasil, 2024f). Essa política deverá nortear e estimular o uso de combustíveis e materiais alternativos na indústria de cimento.

No contexto municipal, existem algumas iniciativas. A cidade de São José Dos Campos, no estado de São Paulo, adotou um novo Código de Edificações e passa exigir a adoção de insumos, equipamentos e sistemas sustentáveis em 100% das obras edilícias. Estabelece uma lista de opções com mais de oitenta estratégias sustentáveis inovadoras, sendo algumas ligadas à especificação de materiais mais sustentáveis e menor pegada de carbono (São José dos Campos, 2022).

Em relação ao setor privado, existem algumas certificações de sustentabilidade de edificações que ajudam na difusão de práticas de descarbonização, inclusive a especificação de materiais de menor pegada de carbono, incluindo o cimento Portland e outros materiais cimentícios. No Brasil, as mais utilizadas são o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), Alta Qualidade Ambiental (AQUA-HQE) e EDGE Buildings. No entanto, elas acabam sendo aplicadas principalmente em edificações comerciais do setor privado e algumas, mais recentemente, para edificações residenciais. A Caixa Econômica Federal criou um selo semelhante chamado de Selo Casa Azul + CAIXA, voltado para Habitações de Interesse Social (HIS) brasileiras, mas na prática é pouco utilizado.

Atualmente em consulta pública, a Taxonomia Sustentável Brasileira (TSB) deverá orientar os investimentos públicos e privados alinhados aos objetivos climáticos, ambientais

e socioeconômicos, a fim de contribuir para a consolidação de uma economia de baixo carbono (Brasil, 2024g). Embora os limites quantitativos para os critérios técnicos ainda estejam em fase de definição, a proposta aponta que, na indústria de cimento, serão consideradas sustentáveis, atividades que atenderem ao menos um dos critérios: (i) limite de intensidade de emissões diretas associadas aos processos de produção de cimento para novos investimentos (limite a definir); (ii) uso de combustíveis alternativos em substituição ao combustíveis fósseis (% a definir); (iii) substituição de clínquer por material alternativo e (iv) instalação de tecnologia de captura e armazenamento de carbono. Além da indústria do cimento, o setor da construção civil também é contemplado na TSB, no qual a construção e retrofit de edifícios possuem critérios associados principalmente, ao desempenho de energia primária anual (kwh/m²/ano) e onde são incentivadas as certificações existentes de construção sustentável, assim como as habitações de interesse social.

Espera-se que o Plano Clima seja o instrumento para consolidar as estratégias e ações especificadas para o setor industrial, aprimorando assim sua governança e o direcionamento de esforços e recursos financeiros para viabilizar as políticas de neoindustrialização alinhadas à descarbonização (CNI, 2024).

Em suma, é possível observar que existem algumas iniciativas; no entanto, muitas estão isoladas e não se comunicam, especialmente em termos de sua governança (ex. coordenação por diferentes Ministérios e atuação em diferentes esferas – federal, estadual e municipal). Algumas são muito pontuais, com pouco potencial de ganho de escala. Outra questão importante é que mudanças governamentais atrapalham a continuação de muitas iniciativas e políticas, dificultando todo o processo. O ideal é que projetos grandes, como aqueles voltados para o setor de HIS e obras públicas tomassem a frente para ganhar uma maior escala e servissem de exemplo para o restante do país.

5. Desenho da política

5.1. Análise das estratégias de sucesso internacional que podem ser replicadas/adaptadas no Brasil

Algumas estratégias internacionais, especialmente no contexto da União Europeia (UE), merecem destaque, conforme foi levantado no estudo de Reis *et al* (2023):

- *Green New Deal* (GND): Esse plano tem como objetivo utilizar tecnologias limpas e de sustentabilidade que compõem o GND a fim de alcançar a era industrial de emissões líquidas da UE para assim cumprir as metas climáticas europeias. Esse plano se aplica a diferentes setores: energético, transportes, construção civil, industrial, entre outros. Entre as tecnologias pensadas relacionadas ao setor de cimentos estão a economia circular, o CCS e CCUS.
- Pacote legislativo *Fit for 55*: consiste em um conjunto de propostas legislativas e emendas à legislação europeia, a fim de auxiliar a UE a reduzir emissões de GEE em 55% até 2030 (comparado aos níveis de 1990) e alcançar a neutralidade climática até 2050. Algumas que podem ser aplicadas ao mercado brasileiro para exportação do cimento:
 - *Emissions Trading System* (EU ETS) ou Sistema de Comércio de Emissões da UE - trata-se de um mercado de carbono baseado em um sistema *cap and trade* de licenças de emissão de indústrias de uso intensivo de energia e do setor energético. O EU ETS é considerado a principal ferramenta da UE para garantir a redução das emissões.
 - *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) ou Mecanismo de Ajuste Fronteiriço de Carbono - tem o objetivo de garantir que os esforços de redução de emissões da União Europeia não sejam compensados pelo aumento de emissões fora de suas fronteiras pela. Dessa forma, é possível definir um preço sobre a importação de produtos industriais de elevada emissão de carbono, garantindo uma concorrência justa para as indústrias europeias.
- Práticas ESG adotadas pela União Europeia: o conceito ESG refere-se à forma como empresas e investidores incorporam práticas ambientais, sociais e de governança em seus modelos de negócios. Algumas podem ser aplicadas ao setor de cimentos:

- *Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)* ou Diretiva de Relatórios de Sustentabilidade Corporativa – a legislação proposta como parte do pacote GND estabelece requisitos para grandes empresas (cotadas e não cotadas em mercados regulamentados na UE) para que divulguem informações completas sobre as suas práticas de sustentabilidade. Essas informações devem abranger a divulgação de emissões de GEE, bem como objetivos e metas para sua redução, considerando horizontes até 2030 e 2050.
- *Carbon Contracts for Difference (CCfD)* ou Contratos de Carbono por Diferença – é um programa de subsídio para a descarbonização de empresas lançado pelo governo alemão. Seu objetivo é subsidiar um aporte financeiro de € 50 bilhões por cerca de 15 anos para indústrias com uso intensivo de energia e altas emissões de GEE, como por exemplo, o cimento. Tem o objetivo de conter custos e riscos de investimento que impedem a descarbonização da produção dessas indústrias.
- *Science Based Targets Initiative (SBTi)* - são um conjunto de metas empresariais, apoiadas nas ciências climáticas, com o intuito de reduzir a geração de GEE nos processos produtivos, a fim de que possam ser cumpridas as diretrizes estabelecidas no Acordo de Paris. Foi criada por quatro organizações – Carbon Disclosure Project (CDP), Pacto Global da ONU, World Resources Institute (WRI) e World Wide Fund for Nature (WWF) – com o intuito de proporcionar um caminho para que as empresas reduzam suas emissões de GEE enquanto promovem o crescimento dos seus negócios, tendo em vista as necessidades e particularidades da nova realidade climática do planeta.
- Regulamentações e legislações nacionais/estaduais/municipais que definirão metas de carbono para a construção de novas edificações e/ou retrofit, com base na metodologia de ACV. Alguns países europeus, como França, Inglaterra, Suécia, Dinamarca, Noruega, entre outros, já possuem suas regulamentações com metas incrementais (normalmente em $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^2$ ou $\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^2\text{/ano}$) de redução de carbono dos projetos de edificações (Barjot; Malmqvist, 2024; One Click LCA, 2022).

Além de iniciativas ligadas a regulamentações e legislações, financiamento e taxaço são sendo pesquisados cimentos alternativos ou novos produtos cimentícios, como por exemplo:

- *Limestone calcined clay cement (LC³)*: é um tipo de cimento inovador que combina fíler calcário e argila calcinada e reduz a quantidade de clínquer na mistura. O LC³ pode reduzir as emissões de CO₂ em até 40% em comparação com o cimento Portland

convencional. É composto de matérias-primas abundantes e emprega argilas de baixa qualidade, como caulim, que são abundantes em muitas partes do mundo. Não requer modificações significativas nas plantas de cimento existentes, tornando-o uma opção de maior potencial. Dentre os cimentos alternativos existentes o LC³ aparece como uma das alternativas mais viáveis (Sánchez Berriel *et al.*, 2016; Scrivener *et al.*, 2018).

- Cimentos geopoliméricos: são cimentos formados pela reação de materiais ricos em alumínio e silício (como cinzas volantes, escórias ou resíduos de outros processos industriais) com soluções alcalinas, chamados de ativadores alcalinos (hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, silicato de sódio e silicato de potássio). Uma das grandes dificuldades de aplicação está relacionada à disponibilidade de algumas matérias-primas e os elevados custos dos ativadores alcalinos. Algumas pesquisas apontam que a pegada de carbono dos cimentos geopoliméricos pode ser superior à do cimento Portland tradicional (Assi *et al.*, 2020; Heath *et al.*, 2014; Passuello *et al.*, 2017).
- Bioconcretos e bioargamassas: são concretos ou argamassas que substituem parte ou a totalidade dos agregados minerais (areia e brita) por agregados de origem vegetal (ex. serragem de madeira, resíduos agropecuários e outras fibras vegetais, como é o caso do cânhamo). Os agregados vegetais conseguem estocar CO₂ e, portanto, dependendo da quantidade presente no material, pode até gerar créditos de carbono (um estoque de carbono superior a emissão). Uma grande dificuldade de implementação está relacionada a questão técnica como durabilidade biológica e resistência ao fogo (Arehart *et al.*, 2020; Arrigoni *et al.*, 2017; Melo *et al.*, 2023).

Alguns desses materiais já estão sendo aplicados comercialmente, principalmente na realidade de alguns países do Norte Global (principalmente no contexto europeu). No entanto, não se sabe se haverá um aumento considerável na escala de aplicação. Em alguns estudos, espera-se uma adoção estimada de apenas 5% para atender a demanda esperada de materiais cimentícios até 2050 (Habert *et al.*, 2020b). Isso se dá devido principalmente a: dificuldades em termos de mudanças tecnológicas nas fábricas; disponibilidade da quantidade adequada das matérias-primas; maior custo em relação ao cimento Portland; questões normativas; falta de profissionais capacitados; e aceitação pelo setor.

5.2. Análise dos aspectos essenciais para uma política de sustentabilidade industrial da cadeia produtiva de cimento

Com base no que foi exposto no presente documento, para uma política de sustentabilidade industrial da cadeia produtiva de cimento, elencam-se principais aspectos que precisam ser considerados

- I. Revisão normativa e mecanismos de regulação e legislação com metas claras de redução de emissão de GEE das empresas;
- II. Maior integração entre as diferentes indústrias e setores que possuem relações diretas e indiretas com produção do cimento, principalmente indústria do aço, setor florestal, agricultura e outras indústrias que geram resíduos com potencial de serem utilizados como matéria-prima ou combustível para a indústria de cimento;
- III. Fortalecimento da interação entre toda a cadeia e dos diferentes stakeholders, principalmente quem vai projetar e especificar materiais, especialmente cimento e materiais cimentícios, os fabricantes de materiais e quem será responsável pelo processo de construção;
- IV. Avaliação econômica das medidas propostas de descarbonização e seu impacto no custo final do produto e edificações;
- V. Precificação do carbono e mecanismos de financiamento que suportem a transição para um processo de baixo carbono;
- VI. Combate à informalidade do setor e investimento em educação e capacitação;
- VII. Disponibilidade de indicadores de carbono realistas e ferramentas de cálculo e de projetos de edificações e de infraestrutura de baixo carbono (ex. Sidac e CECarbon);
- VIII. Incentivo de políticas públicas relacionadas (ex. Política Nacional de Economia Circular, etc.), projetos governamentais (ex. Projeto MCTI) e integração entre programas (ex. PBQP-H) existentes e entre as diferentes esferas (federal, estadual e municipal) e com iniciativas do setor privado (ex. selos e certificações de sustentabilidade de edificações e práticas de ESG); e
- IX. Análise transetorial e *trade-offs* entre indicadores ambientais, econômicos e sociais.

O desenho dessas políticas pode se basear nas estratégias internacionais de sucesso, como as aqui apresentadas (ex. GND) e devem se comunicar com metodologias aceitas como o Science Based Targets Initiative (SBTi).

5.3. Análise SWOT e avaliação dos nichos da cadeia produtiva de cimento por viabilidade de políticas de sustentabilidade

A matriz SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, threats*) é uma ferramenta estratégica que identifica forças, fraquezas, oportunidades e ameaças de um setor ou organização, permitindo uma visão ampla de fatores internos e externos que influenciam seu desempenho. Para a indústria de cimento no Brasil, realizar essa análise é crucial, pois ajuda a entender a situação atual do setor.

I. Forças (*Strengths*)

- Matriz energética e elétrica limpa: a indústria brasileira se beneficia de uma matriz de energia elétrica predominantemente renovável, com fontes como hidrelétrica, solar, eólica e biomassa, o que reduz a pegada de carbono da produção.
- Fábricas modernas e eficientes: as plantas de cimento no Brasil são em sua maioria modernas, com tecnologias como fornos de processo seco e moinhos verticais, que são mais eficientes em termos energéticos.
- Uso de combustíveis alternativos: crescente utilização de resíduos industriais, biomassa e outros combustíveis alternativos para substituir combustíveis fósseis, reduzindo as emissões de carbono.
- Baixa intensidade de carbono: Emissões de CO₂ por tonelada de cimento no Brasil são significativamente menores que a média mundial (565 kg CO₂/t contra 620 kg CO₂/t).
- Incorporação de adições: o aumento da incorporação de adições como escória de alto forno, cinzas volantes, fíler calcário, argila calcinada e biocinzas contribui para a redução do uso de clínquer, que é a parte mais intensiva em carbono do processo produtivo.

II. Fraquezas (*Weaknesses*)

- Dependência do transporte rodoviário: a indústria no Brasil depende majoritariamente do transporte rodoviário para distribuição, aumentando as emissões de carbono e os custos logísticos.
- Uso limitado de tecnologias de captura de carbono: a implementação de tecnologias como CCUS ainda está em estágio inicial e enfrenta desafios técnicos e econômicos. Os elevados custos podem aumentar consideravelmente o valor do produto final e comprometendo a vida de grande parte da população.

- Recursos limitados para inovações tecnológicas: o custo elevado das tecnologias de baixo carbono, como oxi-combustão e retrofit de plantas, pode limitar a capacidade de investimento das empresas.
- Desafios para a reciclagem: Embora o setor tenha um potencial para o uso de materiais reciclados, a implementação de soluções de economia circular ainda não se encontra no estado de desenvolvimento desejado e as distâncias de transporte elevadas ensejam dificuldades logísticas.
- Falta de clareza na NDC nacional quanto às metas e estratégias setoriais e à estrutura de governança para liderar as ações de descarbonização dessa cadeia produtiva;

III. Oportunidades (*Opportunities*)

- Incentivos à descarbonização: a demanda global por sustentabilidade e a pressão por metas de neutralidade de carbono até 2050 impulsionam oportunidades para a implementação de tecnologias de captura de carbono, o uso de combustíveis alternativos e o investimento na descarbonização dos setores industriais.
- Desenvolvimento de biocombustíveis e biocinzas: o aumento do uso de resíduos agrícolas, como casca de arroz e bagaço de cana, bem como biocombustíveis, representa uma oportunidade para a indústria reduzir sua dependência de combustíveis fósseis.
- Embora os custos para o CCUS podem ser vistos como uma fraqueza, novas soluções podem ser enxergadas como oportunidades, especialmente aquelas relacionadas à produção de biomassa e com o uso da matriz energética mais limpa do Brasil.
- Parcerias intersetoriais: colaborações entre a indústria do cimento, setores de energia renovável e pesquisa tecnológica podem acelerar a inovação e a implementação de práticas mais sustentáveis.

IV. Ameaças (*Threats*)

- Pressão regulatória e metas climáticas: a crescente pressão por parte de governos e organismos internacionais para atingir metas de redução de emissões de GEE pode resultar em maiores custos operacionais e exigências tecnológicas.
- Escassez de recursos naturais: a diminuição da disponibilidade de matérias-primas essenciais como calcário e argila, além das restrições à mineração (exemplo areia), pode aumentar os custos e afetar a produção.
- Concorrência internacional: empresas estrangeiras que adotam mais rapidamente tecnologias de baixo carbono podem ganhar vantagem competitiva no mercado global.

- Custo elevado de novas tecnologias: a adoção de tecnologias como oxi-combustão, CCUS e outras práticas inovadoras de descarbonização exige altos investimentos iniciais, o que pode ser uma barreira para muitas empresas no Brasil.
- Impacto da regulamentação europeia: a taxonomia sustentável da União Europeia e outras regulamentações internacionais podem restringir o uso de combustíveis alternativos derivados de resíduos, prejudicando uma estratégia importante de mitigação de carbono no cenário brasileiro.

6. Conclusão

Com base nos dados apresentados no presente levantamento, conclui-se que uma abordagem integrada, com foco em inovação, regulamentação e parcerias estratégicas, é fundamental para transformar a cadeia cimenteira brasileira em uma referência global em sustentabilidade (e não apenas na questão da descarbonização). As principais conclusões deste *working paper* são:

- Relevância da descarbonização: a indústria cimenteira brasileira, embora tecnologicamente avançada e com uma matriz energética limpa, tem um papel significativo nas emissões nacionais de CO₂, o que reforça a necessidade de ações estruturadas para sua descarbonização.
- Estratégias essenciais: reduzir o teor de clínquer no cimento, substituir combustíveis fósseis por fontes alternativas, adotar tecnologias como CCS/CCUS, melhorar a eficiência energética e aumentar a industrialização e racionalização da construção civil são medidas cruciais para alcançar a neutralidade de carbono até 2050.
- Importância das políticas públicas: precificação do carbono, incentivos à inovação, normatização de materiais de baixo carbono e integração entre setores produtivos são elementos-chave para viabilizar a transição para uma economia de baixo carbono.
- Desafios do cenário brasileiro: há barreiras técnicas e logísticas, como a dependência do transporte rodoviário, limitações na oferta de adições minerais e a necessidade de diversificar as fontes de biomassa para combustíveis alternativos.
- Perspectivas para inovação: investimentos em tecnologias disruptivas, como captura e uso de carbono, maior industrialização no setor da construção civil e uso de bio-cinzas, são indispensáveis para atender à crescente demanda de forma sustentável.
- Integração de políticas climáticas e sociais: a descarbonização da cadeia cimenteira deve ser compatível com programas sociais e habitacionais, promovendo benefícios econômicos e sociais.
- Coordenação entre *stakeholders*: a colaboração entre fabricantes, projetistas, construtores, governos, universidades e outros setores produtivos é essencial para superar desafios e implementar soluções integradas que atendam às metas climáticas e promovam a economia circular.

Referências

Agência Nacional de Mineração (ANM). *Anuário Mineral Brasileiro*. Brasília: ANM, 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODIyOWJlMTgtZTBiNi00ODFhLWJiOGEtYzlmOWM3MjhmMWQ4IiwidCI6ImEzMDgzZTIxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9>. Acesso em: 2 ago. 2024.

Arehart, J. H.; Nelson, W. S.; Srubar III, W. V. On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 266, 1, 121846. Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846>

Arrigoni, A.; Pelosato, R.; Melià, P.; Ruggieri, G.; Sabbadini, S.; Dotelli, S. Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, v. 149, n. 15, 1051-1061, April 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>

Assi, L. N.; Carter, K.; Deaver, E.; Ziehl, P. Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 263, n. 1, 121477, August 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>

Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP); Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). *Roadmap Net Zero – Visão da Indústria Brasileira do Cimento para alcançar a neutralidade de emissões ao longo do seu ciclo de vida até 2050*. ABCP; SNIC, 2022. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/neutralidade-carbono/apresentacao-roadmap-net-zero-v10.pdf>. Acesso em 04 dez. 2024.

Barbhuiya, S.; Das, B. B.; Adak, D. Roadmap to a net-zero carbon cement sector: Strategies, innovations and policy imperatives. *Journal of Environmental Management*, v. 359, 121052, May 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121052>

Barbhuiya, S.; Kanavaris, F.; Das, B. B.; Idrees, M. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*, v. 86, n. 1, 108861, June 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108861>

Barjot, Z.; Malmqvist, T. Limit values in LCA-based regulations for buildings – System boundaries and implications on practice. *Building and Environment*, v. 259, 1, 111658, July 2024,. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111658>.

Boanada-Fuchs, A.; Heierli, U.; Scrivener, K. *Low carbon cement*. Harmonizing Environmental Goals and Housing Needs. [LC3 Project.] Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne; Climate Works Foundation. Disponível em: <https://lc3.ch/wp-content/uploads/2024/05/LC3-Digital-Version-Final-26th-July.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2024.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Projeto do MCTI quer descarbonizar construção civil por meio de edifícios com zero emissão de CO₂*. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/12/projeto-do-mcti-quer-descarbonizar-construcao-civil-por-meio-de-edificios-com-zero-emissao-de-co2>

Brasil. Ministério de Minas e Energia. *Plano de Transição Ecológica*. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-transicao-energetica-requer-alternativas-de-baixo-carbono-e-inclusao-social/PLANTE20224.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2024.

Brasil. Ministério da Indústria, Comércio e Serviços. *Comitê cria 5 grupos de trabalho para impulsionar a Estratégia BIM-BR*. Brasília, DF: Ministério da Indústria, Comércio e Serviços, 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/abril/comite-cria-5-grupos-de-trabalho-para-impulsionar-a-estrategia-bim-br>. Acesso em: 08 set. 2024.

Brasil. Construção do Brasil: *Plataforma para a Competitividade Industrial*. Brasília, DF: Ministério da Indústria, Comércio e Serviços, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/ambiente-de-negocios/competitividade-industrial/construa-brasil>. Acesso em: 08 set. 2024.

Brasil. Ministério das Cidades. *Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat*. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2024d. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/programa-brasileiro-de-qualidade-e-produtividade-do-habitat-pbqp>. Acesso em: 20 dez. 2024.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. *SIDAC - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção*. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2024e. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/sidac>. Acesso em: 20 dez. 2024.

Brasil. Senado Federal. Comissão de Meio Ambiente. *Projeto de Lei nº 1874/2022*. Institui a Política Nacional de Economia Circular (PNEC) e altera a Lei nº 10.332, de 19 de dezembro de 2001, a Lei nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010 (Lei do Pré-Sal), e a Lei nº

14.133, de 1º de abril de 2021 (Lei de Licitações e Contratos Administrativos), para adequá-las à nova política. Câmara dos Deputados, 21 mar. 2024f. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2422879>.

Brasil. Ministério da Fazenda. *Taxonomia Sustentável Brasileira - 1ª fase (Em consulta pública)*. Brasília, DF: Ministério da Fazenda, 2024g. Disponível em: <https://www.gov.br/participamaisbrasil/taxonomia-sustentavel-brasileira>. Acesso em: 20 dez. 2024.

Busch, P.; Kendall, A.; Murphy, C. W.; Miller, S. A. Literature review on policies to mitigate GHG emissions for cement and concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 182, 106278, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106278>. Acesso em: 03 ago. 2024

Caldas, L. R.; Saraiva, A. B.; Andreola, V. M.; Toledo Filho, R. D. Bamboo bio-concrete as an alternative for buildings' climate change mitigation and adaptation. *Construction and Building Materials*, v. 263, n. 10, p. 120652, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120652>.

Cheng, D.; Reiner, D. M.; Yang, F.; Cui, C.; Meng, J.; Shan, Y.; Liu, Y.; Tao, S.; Guan, D. Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2023. DOI: [10.1038/s41467-023-43660-x](https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x).

Confederação Nacional da Indústria (CNI). *Oportunidades e riscos da descarbonização*. Brasília, DF: CNI, 2023. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/portaldaindustria/noticias/media/filer_public/ec/72/ec726e01-14f1-4b3c-b7d5-9738abc60953/oportunidades_e_riscos_da_descarbonizacao_cni.pdf. Acesso em: 5 out. 2024.

Confederação Nacional da Indústria (CNI). *Descarbonização da indústria: análise de experiências internacionais e recomendações para o Brasil*. Brasília, DF: CNI, 2024. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/f6/dd/f6ddbf14-6eea-4c18-a008-7c05b778ec3e/id_248438_descarbonizacao_da_industria_interativo.pdf. Acesso em: 5 out. 2024.

Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). *Relatório de Ação Climática 2022*. São Paulo: CSN, 2022. Disponível em: <http://www.csn.com.br/wp-content/uploads/sites/452/2023/08/Climate-Action-Report.pdf>. Acesso em: 08 set. 2024

Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). *Relatório Integrado Grupo CSN 2023*. São Paulo: CSN, 2024a. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/c13bfd26-0e38-40d4-80f7-8990c9e1d702/0b1bb0f3-6457-2549-b82b-80a5ecee0e77?origin=2>. Acesso em: 08 set. 2024

Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). *Mudanças climáticas*. São Paulo: CSN, 2024b. Disponível em: <https://esg.csn.com.br/meio-ambiente/mudancas-climaticas/>. Acesso em: 08 set. 2024

Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Tavares, L. M.; Fairbairn, E. M. R. Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction and Building Materials*, v. 29, 641-646. April. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.095>

Melo, P. C.; Caldas, L. R.; Masera, G.; Pittau, F. The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 433, 25, 139862. December 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139862>

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Atlas da Eficiência Energética Brasil 2020*. Relatório de Indicadores. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021_PT_2022_02_04.pdf.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Atlas da Eficiência Energética Brasil 2023*. Relatório de Indicadores. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-788/Atlas_Brasil_2023_PT_rev_set2024.pdf.

Engemix. *Spectra*. Engemix, 2024. Disponível em: <https://www.engemix.com.br/spectra>. Acesso em: 08 set. 2024

European Biochar Industry Consortium (EBI). *Performance of biochar in concrete*. Freiburg im Breisgau: EBI, 2024.

Fairbairn, E. M. R.; Paula, T. P.; Cordeiro G. C.; Americano, B. B.; Toledo Filho, R. D. Evaluation of partial clinker replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emission reductions and potential for carbon credits. *Revista IBRACON Estrututura e Materiais*, v. 5 n. 2, April 2012.

Gallego Dávila, J.; Sacchi, R.; Pizzol, M. Preconditions for achieving carbon neutrality in cement production through CCUS. *Journal of Cleaner Production*, v. 425, 1 Nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138935>

Global Cement and Concrete Association (GCCA). *Concrete future: cement industry net zero progress report 2023*. GCCA, 2023. Disponível em: <https://gccassociation.org/cement-industry-net-zero-progress/>. Acesso em: 19 dez. 2024.

Global Cement and Concrete Association (GCCA). *Making low-carbon cement manufacturing investable*. GCCA, 2024a. Disponível em: <https://gccassociation.org/concretefuture/making-low-carbon-cement-manufacturing-investable/>. Acesso em: 03 ago. 2024.

Global Cement and Concrete Association (GCCA). *The role of public policy*. GCCA, 2024b. Disponível em: <https://gccassociation.org/concretefuture/the-role-of-public-policy/>. Acesso em: 03 ago. 2024.

Habert, G.; Miller, S. A.; John, V. M.; Provis, J. L.; Favier, A.; Horvath, A.; Scrivener, K. L. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, p. 559-573, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.

Heath, A.; Paine, K.; McManus, M. Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, v. 78, n. 1, 75-83. Sep. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.046>

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor Mineral 2024: Ano Base 2022*. Brasília, DF: Ibram, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/IBRAM_Inventario-Efeito-Estufa_web-3.pdf. Acesso em: 01 ago. 2024.

InterCement Brasil. *Caderno de Indicadores 2021*. São Paulo: InterCement Brasil, 2021. Disponível em: <https://brasil.intercement.com/wp-content/uploads/2022/03/InterCement-2021-Caderno-de-Indicadores-V13r.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2024.

InterCement Brasil. *Desenvolvimento Sustentável*. InterCement Brasil, 2024. Disponível em: <https://intercement.com/desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 1 ago. 2024.

InterCement é destaque em lançamento de roadmap tecnológico para a indústria do cimento. *InterCement Brasil*, 10 abr. 2019. Disponível em: <https://intercement.com/noticia/intercement-e-destaque-em-lancamento-de-roadmap-tecnologico-para-a-industria-do-cimento/>. Acesso em: 1 ago. 2024.

International Energy Agency (IEA). *Emissions*. How much CO₂ does Brazil emit. IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil/emissions#what-are-the-main-sources-of-co2-emissions-in-brazil>. Acesso em: 1 ago. 2024.

International Energy Agency (IEA). *Transforming Industry through CCUS*. IEA, 2019. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/0d0b4984-f391-44f9-854f-fda1ebf8d8df/Transforming_Industry_through_CCUS.pdf <https://www.iea.org/countries/brazil/emissions#what-are-the-main-sources-of-co2-emissions-in-brazil>. Acesso em: 19 dez. 2024.

International Energy Agency (IEA); Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Atlas of energy efficiency: Brazil 2023*. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-788/Atlas%20of%20Energy%20Efficiency%20Brazil%202023.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2024.

International Energy Agency (IEA); World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). *Technology Roadmap*. Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA, Apr. 2018. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2024.

Monteiro, J.; Roussanaly, S. CCUS scenarios for the cement industry: Is CO₂ utilization feasible? *Journal of CO₂ Utilization*, v. 61, July 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102015>.

Murali, G.; Wong, L. S. A comprehensive review of biochar-modified concrete: Mechanical performance and microstructural insights. *Construction and Building Materials*, v. 425, p. 135986, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135986>.

Norster, T. Why is the cement industry labelled hard-to-abate? *DNV*, 21 March 2023. <https://www.dnv.com/article/why-is-the-cement-industry-labelled-hard-to-abate--241192/>. Acesso em: 03 ago. 2024.

Nossos produtos recebem certificação ambiental inédita no Brasil. Votorantim Cimentos, 16 mai. 2023c. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/nossos-produtos-recebem-certificacao-ambiental-inedita-no-brasil/>. Acesso em: 1 ago. 2024.

Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). *Hubs de CCUS no Brasil: Construindo Cenários, Superando Barreiras.* 2024. Disponível em: <https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2024/03/CCUS-Brazil-WP-PT-vf.pdf>. Acesso em 19 dez. 2024.

O mercado do cimento Brasil em 2022. *Cimento.org*, 28 jul. 2023. Disponível em: <https://cimento.org/o-mercado-do-cimento-brasil-em-2022/>. Acesso em: 01 set. 2024.

Observatório do Clima. *Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa* (SEEG). OC, 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 06 dez. 2024.

One Click LCA. *Construction carbon regulations in Europe: review & best practices.* One Click LCA, Out. 2022. Disponível em: <https://oneclicklca.com/resources/ebooks/construction-carbon-regulation-europe#:~:text=The%20report%20covers%20all%20relevant%20LCA%20and>

Our World in Data. *Annual CO₂ emissions from cement.* Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-cement?tab=chart&time=1990..latest&country=CHN~USA~IND~ZAF~AUS~BRA>. Acesso em: 2 ago. 2024.

Palermo, G. C.; Branco, D. A. C.; Fiorini, A. C. O.; Freitas, M. A. V. Comparative life cycle assessment of three 2030 scenarios of the Brazilian cement industry. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, n. 153, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09822-y>. Acesso em: 1 ago. 2024.

Passuello, A.; Rodríguez, E. D.; Hirt, E.; Longhi, M.; Bernal, S. A.; Provis, J. L.; Kirchheim, A. P. Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Production* 2017, 166, 680-689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.007>

Reis, D. C.; Souza, J. F. T.; Punhagui, K. R. G.; Chagas e Silva, L. S.; Orlandini, L. C.; Rathmann, R.; Pacca, S. A.; John. V. M.; Barbosa, V. *Estratégias de descarbonização das indústrias do cimento e do aço e o papel do setor florestal no que tange à construção civil.* São Paulo: WRI Brasil, 2023. Disponível em: https://bivica.org/files/6872_Plano%20Cimento_final.pdf. Acesso em: 06 dez. 2024.

Rinzler, C. What will it take to decarbonize cement? *Breakthrough Energy*, 18 Jun. 2024. Disponível em: <https://www.breakthroughenergy.org/news/decarbonize-cement/>. Acesso em: 03 ago. 2024

Rocha, J.H.A.; de Siqueira, A.A.; de Oliveira, M.A.B.; Castro, L.d.S.; Caldas, L.R.; Monteiro, N.B.R.; Toledo Filho, R.D. Circular Bioeconomy in the Amazon Rainforest: Evaluation of Açai Seed Ash as a Regional Solution for Partial Cement Replacement. *Sustainability* 2022, 14, 14436. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142114436>

Sánchez Berriel, S.; Favier, A.; Domínguez, E.R.; Sánchez, I. R.; Machado, U.; Scrivener, K.; Hernández, F. M.; Habert, G. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 361-369, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>.

Sanei, H.; Rudra, A.; Przymwit, Z.; Kousted, S.; Sindlev, M.; Zheng, X.; Nielsen, S.; Petersen, H. Assessing biochar's permanence: an inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, v. 281, p. 104409, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>. São José dos Campos. Prefeitura da Cidade de São José dos Campos. *Manual de Estratégias Sustentáveis*. São José dos Campos: Prefeitura, mar. 2022. Disponível em: <https://www.sjc.sp.gov.br/media/183656/manual-completo-publicacao.pdf>. Acesso: 06 dez. 2024.

Science Based Targets Initiative (SBTI). *Companies taking action*. Science Based Targets, 2024. Disponível em: <https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action#what-is-the-difference-between-near-term-long-term-and-net-zero-targets>. Acesso em 08 set. 2024

Scrivener, K. L.; John, V. M.; Gartner, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

Shivaprasad, K. N.; Yang, H. M.; Singh, J. K. A path to carbon neutrality in construction: An overview of recent progress in recycled cement usage. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 83, May 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102816>.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). *Consumo aparente de cimento por regiões e estados (i)*. 2023. São Paulo: SNIC, 2024. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1720464057.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2024.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). *Relatório Anual 2022*. São Paulo: SNIC, 2022. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf. Acesso em: 01 set. 2024.

Statista. *Installed capacity of selected top cement producers worldwide in 2024*. Statista, 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/297845/cement-producers-capacity/>. Acesso em: 01 set. 2024.

Visedo, G.; Pecchio, M. (Coords.) *Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p. Disponível em: https://www.dropbox.com/s/9cbtj1c9oquigf8/Roadmap%20Tecnol%C3%B3gico%20do%20Cimento_Brasil.pdf?dl=0. Acesso em: 01 ago. 2024.

Votorantim Cimentos. *Nosso compromisso para 2030 – Construindo um futuro sustentável*. São Paulo: Votorantim Cimentos, jul. 2023a. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2023/07/Votorantim-Cimentos-Nossos-Compromissos-2030-03.07.23.pdf>. Acesso em: 05 out. 2024.

Votorantim Cimentos. *Sistema de Gestão Ambiental*. São Paulo: Votorantim Cimentos, ago. 2023b. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2023/08/Site-SGA.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2024.

Votorantim Cimentos. *Descarbonização VC. Rumo ao concreto carbono neutro*. Votorantim Cimentos, 2024a. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/esg/descarbonizacao/>. Acesso em: 1 ago. 2024.

Votorantim Cimentos. *Relatório Integrado 2023*. São Paulo: Votorantim Cimentos, 2024b. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2024/04/Relatorio-Integrado-2023.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2024



DECARBONIZATION AND INDUSTRIAL POLICY:
CHALLENGES FOR BRAZIL
