INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND: UMA ANÁLISE INTEGRATIVA

JULIANA GAIO SOMER

Foz do Iguaçu
2026

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND: UMA ANÁLISE INTEGRATIVA

JULIANA GAIO SOMER

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Edna Possan

Foz do Iguaçu
2026

Catalogação elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação
Catalogação de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

S697a
Somer, Juliana Gaio.
Avaliação do processo de descarbonização da construção pelo fluxo do cimento Portland: uma análise integrativa / Juliana Gaio Somer. - Foz do Iguaçu-PR, 2026.
143 p.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu-PR, 2026.
Orientadora: Edna Possan.

1. Cimento Portland. 2. Carbono – Controle de emissão. 3. Construção civil - Sustentabilidade. 4. Clinquer - Redução. 5. Durabilidade das construções. I. Possan, Edna. II. Título.

CDU 691.5:504.7

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND: UMA ANÁLISE INTEGRATIVA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br EDNA POSSAN
Data: 23/10/2026 11:45:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientadora: Profa. Dra. Edna Possan
UNILA

Documento assinado digitalmente
gov.br GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL
Data: 10/10/2026 08:21:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gersson Fernando Barreto Sandoval
UPTC (Colômbia)

Documento assinado digitalmente
gov.br JAIRO JOSE DE OLIVEIRA ANDRADE
Data: 20/10/2026 04:45:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade
PUC-RS

Documento assinado digitalmente
gov.br GIOVANNA PATRICIA GAVA OYAMADA
Data: 20/10/2026 11:09:44-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada
Unioeste

Documento assinado digitalmente
gov.br EMERSON FELIPE FELIX
Data: 20/10/2026 17:35:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Emerson Felipe Felix
Unesp

Foz do Iguaçu, 26 de agosto de 2026.

Àqueles que renunciam aos privilégios para de fato lutar por um mundo melhor, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque tudo é para a glória dEle.

Ao meu Marcelo, porque reconheço que ter alguém especial para compartilhar a vida é um privilégio.

A Liz, que trouxe novos propósitos, cores, movimento e alegria aos meus dias.

Aos meus pais, por todo o amor demonstrado. Nenhuma dificuldade que a vida trouxe foi capaz de os paralisar. Essa resiliência é inspiradora e não poderia me ser ensinada em nenhuma sala de aula.

À tia Hermínia (*in memoriam*) e à tia Nilse, porque desde muito cedo me instigaram e mostraram a possibilidade de caminhos que eu não tinha capacidade de enxergar.

Aos amigos "mais chegados que irmãos" – não tão numerosos, mas absolutamente indispensáveis, sinceros e fiéis, que fazem com que a caminhada aqui seja mais suave e divertida. Para representá-los, nomeio a querida Marta, a qual mantém o largo e lindo sorriso, além do generoso coração, apesar de toda a dor já enfrentada. Obrigada pelas orações e pelo cuidado que sei que têm comigo. A certeza da eternidade com vocês me alegra profundamente.

À professora Elizete (*in memoriam*), que em 1991, na sala de aula multisseriada de uma escola rural municipal, pacientemente começou a sanar minhas dúvidas escolares.

À professora Marcela, que compartilhou comigo parte desta trajetória quando o percurso ainda tomava forma. Obrigada pela dedicação.

À professora Edna, que me acolheu "no meio do caminho". Obrigada porque muito além de orientar, me ouviu, me instruiu e me encorajou.

Aos demais familiares, professores, colegas e profissionais com os quais trabalho e trabalhei – inúmeros, que ao longo da vida têm me ensinado, cada um ao seu modo. A minha trajetória tem marcas de todos vocês.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo fomento e à UNILA, pela possibilidade de concluir esta etapa da minha vida acadêmica.

Observem as aves do céu, que não semeiam, não colhem, nem ajuntam nos celeiros No entanto, o Pai de vocês, que está no céu, as sustenta. Será que vocês não valem mais do que as aves?
Mateus 6:22

SOMER, Juliana Gaio. Avaliação do Processo de Descarbonização da Construção Pelo Fluxo do Cimento Portland: Uma Análise Integrativa. 2026. 143 p. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

A indústria cimenteira é responsável por cerca de 7% das emissões globais antropogênicas de CO_2, o que torna a redução do clínquer, o uso de ligantes alternativos e as tecnologias de captura, estocagem e uso do carbono (CCUS) estratégias essenciais para a descarbonização do setor. Esta tese analisou a descarbonização na construção pelo fluxo do Cimento Portland (CP), da fabricação do material à aplicação do concreto, com uma abordagem integrativa. Foram avaliadas a complexidade das cadeias envolvidas, o estágio de implementação das ações, as implicações para a durabilidade das construções e os custos da redução de CO_2 no mercado brasileiro, com vistas à neutralidade de carbono. Foram conduzidos três estudos (A, B e C) com abordagens qualitativas e quantitativas, baseados em revisão sistemática da literatura (*Scopus* e *Web of Science*) e documentos técnicos setoriais, com ênfase em 2015-2026, além da estimativa dos custos de abatimento de CO_2 no fluxo do CP brasileiro. O estudo A, com 100 artigos base, explorou as dez principais estratégias de descarbonização, sua complexidade e seu estágio de implementação. O estudo B, baseado em 48 artigos, foi analisada a relação entre as propriedades dos cimentos menos emissivos e a durabilidade das construções. No estudo C, foram estimados os custos de abatimento do CO_2 no Brasil, por meio do Custo Marginal de Abatimento (MAC), que relaciona custos e emissões evitadas frente a um cenário base, em USD/tonelada de CO_2, e associados ao mercado de carbono. Os resultados do primeiro estudo indicam que a complexidade de implementação das estratégias é maior na construção, intermediária na produção do concreto e menor na produção do cimento. Nas cadeias do concreto e da construção, as reduções de CO_2 dependem de projetos, seleção de materiais, redução de perdas e aproveitamento de resíduos. Até o momento, as estratégias de mitigação implantadas estão concentradas na indústria cimenteira, sobretudo aquelas vantajosas economicamente. No segundo estudo, a constatação é que, em função da necessidade de reatividade, os cimentos de baixa emissão tendem a apresentar maior finura e, por vezes, maiores teores de silicato tricálcico (C_3S) e aluminato tricálcico (C_3A). A literatura sobre ligantes menos emissivos trata majoritariamente da redução do teor de clínquer pelo uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) novos ou alternativos, e predomina a avaliação de propriedades mecânicas e físico-químicas. Não foram identificados estudos integrativos em cadeia ou de longo prazo sobre a durabilidade desses materiais. Quando presente, a durabilidade concentra-se em estudos de penetração de cloretos e resistência à carbonatação. No Brasil, o uso de MCS pode responder por até 69% das emissões evitadas pelo setor e, conforme resultados do estudo C, representa um custo de abatimento negativo, com economia de até 15,67 USD por tonelada de clínquer (cerca de 30% do valor do clínquer), o que explica sua avançada implantação. O mesmo ocorre com combustíveis alternativos, com economia de até 2,63 USD por tonelada de clínquer. Por outro lado, no cenário global, o CCUS pode responder por até 42% da meta de descarbonização, embora 70% desse avanço deva ocorrer entre 2030 e 2050 e sua adoção pode duplicar o preço do clínquer. A análise integrada evidencia a necessidade de correlacionar as propriedades dos cimentos menos emissivos, os custos de descarbonização e a durabilidade das construções, da fabricação do cimento ao fim do ciclo de vida do concreto, para garantir desempenho a longo prazo. A neutralidade de carbono na cadeia da construção depende da implementação em larga escala do CCUS pela indústria cimenteira, ainda limitada pelo alto custo, maturidade tecnológica e carência regulatória.

Palavras-chave: Redução de clínquer; Vida útil; Baixo carbono; Desempenho; Custos abatimento de CO_2; Mercado de carbono.

SOMER, Juliana Gaio. Evaluación del proceso de descarbonización en la construcción a través del flujo de cemento Portland: un análisis integral. 2026. 143 p. Tesis de Doctorado en Energía y Sostenibilidad – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguaçu.

RESUMEN

La industria cementera genera cerca del 7 % de las emisiones antropogénicas globales de CO_2, por lo que la reducción del clínker, el uso de conglomerantes alternativos y las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) son estrategias esenciales para su descarbonización. Esta tesis analizó la descarbonización en la construcción a través del flujo del cemento Portland (CP), desde su fabricación hasta la aplicación del hormigón, con un enfoque integrador. Se evaluaron la complejidad de las cadenas de valor, el estado de implementación de las acciones de mitigación, las implicaciones para la durabilidad de las construcciones y los costes de reducción de CO_2 en el mercado brasileño, con miras a la neutralidad de carbono. Se realizaron tres estudios (A, B y C) cualitativos y cuantitativos, basados en una revisión sistemática de la literatura (Scopus y Web of Science) y en documentos técnicos sectoriales, con énfasis en 2015-2026. El estudio A, con 100 artículos, exploró las diez principales estrategias de descarbonización, su complejidad y estado de implementación. El estudio B, con 48 artículos, analizó la relación entre las propiedades de los cementos de bajas emisiones y la durabilidad de las construcciones. El estudio C estimó los costes de abatimiento de CO_2 en Brasil, en USD por tonelada de CO_2, mediante el Coste Marginal de Abatimiento (MAC, por sus siglas en inglés), que relaciona costes y emisiones evitadas respecto de un escenario base, y los vinculó con el mercado de carbono. Según el estudio A, la complejidad de implementación es mayor en la construcción, intermedia en la producción de hormigón y menor en la de cemento. En las cadenas del hormigón y de la construcción, las reducciones de CO_2 dependen del diseño, la selección de materiales, la reducción de pérdidas y el aprovechamiento de residuos. Hasta el momento, las estrategias de mitigación implementadas se concentran en la industria cementera, sobre todo las económicamente ventajosas. El estudio B señala que, por la necesidad de reactividad, los cementos de bajas emisiones tienden a presentar mayor finura y, en ocasiones, mayores contenidos de silicato tricálcico (C_3S) y aluminato tricálcico (C_3A). La literatura sobre conglomerantes de menores emisiones trata sobre todo la reducción del clínker mediante materiales cementantes suplementarios (MCS) nuevos o alternativos, con predominio de las propiedades mecánicas y fisicoquímicas. No se identificaron estudios integrativos de toda la cadena ni de largo plazo sobre la durabilidad de estos materiales y, cuando se aborda, se limita a la penetración de cloruros y la resistencia a la carbonatación. En Brasil, los MCS pueden representar hasta el 69 % de las emisiones evitadas por el sector y, según el estudio C, suponen un coste de abatimiento negativo (es decir, un ahorro) de hasta 15,67 USD por tonelada de clínker (aprox. 30 % del valor del clínker), lo que explica su avanzada implementación. Igual ocurre con los combustibles alternativos, con un ahorro de hasta 2,63 USD por tonelada de clínker. En cambio, a escala global, el CCUS podría aportar hasta el 42 % del objetivo de descarbonización, aunque se prevé que el 70 % de este avance se produzca entre 2030 y 2050 y que su adopción duplique el precio del clínker. El análisis integrado evidencia la necesidad de correlacionar las propiedades de los cementos de bajas emisiones, los costes de descarbonización y la durabilidad, desde la fabricación del cemento hasta el final del ciclo de vida del hormigón, para garantizar un buen rendimiento a largo plazo. La neutralidad de carbono en la construcción depende de la implementación a gran escala del CCUS por la industria cementera, aún limitada por el elevado coste, la escasa madurez tecnológica y la carencia de regulación.

Palavras clave: Reducción de clínker; Vida útil; Bajo carbono; Rendimiento; Costos de reducción de CO_2; Mercado del carbono.

SOMER, Juliana Gaio. Assessment of the Construction Decarbonization Process Across the Portland Cement Chain: An Integrative Analysis. 2026. 143 p. Thesis (Ph.D. in Energy and Sustainability) - Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for approximately 7% of global anthropogenic CO2 emissions, making clinker reduction, the use of alternative binders, and carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies essential strategies for the sector's decarbonization. This thesis analyzed decarbonization in the construction sector through the lens of the Portland cement (PC) value chain, from cement manufacturing to concrete application, using an integrative approach. It evaluated the complexity of the value chains involved, the implementation status of mitigation actions, the implications for the durability of structures, and the costs associated with CO_2 reduction within the Brazilian market, with a view to carbon neutrality. Three studies (A, B, and C) were conducted using both qualitative and quantitative methods, drawing on a systematic literature review (Scopus and Web of Science) and technical industry documents, with a focus on the 2015–2026 period, alongside an estimation of CO2 abatement costs within the Brazilian PC value chain. Study A, based on 100 core articles, explored the ten primary decarbonization strategies, their complexity, and their implementation stage. Study B, based on 48 articles, examined the relationship between the properties of low-emission cements and the durability of structures. Study C estimated CO_2 abatement costs in Brazil using the Marginal Abatement Cost (MAC) framework, which relates costs to avoided emissions relative to a baseline scenario, expressed in USD per tonne of CO_2, and related them to the carbon market. The results of Study A indicate that the complexity of implementing these strategies is highest in the construction phase, intermediate in concrete production, and lowest in cement manufacturing. Within the concrete and construction value chains, CO_2 reductions depend on design choices, material selection, loss reduction, and waste utilization. To date, mitigation strategies currently in place are concentrated in the cement industry, particularly economically advantageous ones. Study B finds that, due to the need for reactivity, low-emission cements tend to have greater fineness and, in some cases, higher contents of tricalcium silicate (C_3S) and tricalcium aluminate (C_3A). Existing literature on lower-emission binders focuses primarily on reducing clinker content through the use of new or alternative supplementary cementitious materials (SCMs), with an emphasis on evaluating mechanical and physicochemical properties. No integrative, chain-wide, or long-term studies on the durability of these materials were identified; where durability is addressed, it is generally limited to chloride penetration and carbonation resistance. In Brazil, the use of SCMs can account for up to 69% of the emissions avoided by the sector. As shown in Study C, this approach results in a negative abatement cost, yielding savings of up to USD 15.67 per tonne of clinker (approximately 30% of the clinker's value), which explains its advanced implementation. A similar trend is observed with the use of alternative fuels, which offer savings of up to USD 2.63 per tonne of clinker. Conversely, on a global scale, CCUS could contribute up to 42% of the decarbonization target; however, 70% of this progress is expected to occur between 2030 and 2050, and its adoption could double the price of clinker. This integrated analysis highlights the need to correlate the properties of lower-emission cements, decarbonization costs, and the durability of structures, spanning the entire process from cement production to the end of the concrete's life cycle, to ensure long-term performance. Achieving carbon neutrality in the construction value chain depends on the large-scale implementation of CCUS by the cement industry, a process currently constrained by high costs, limited technological maturity, and the lack of regulatory frameworks.

Keywords: Clinker reduction; Service life; Low carbon; Performance; CO_2 abatement costs; Carbon market.

LISTA DE FIGURAS

FUNDAMENTOS

I. INTRODUÇÃO

Figura 1: Resumo da estrutura da tese..... 25

DESENVOLVIMENTO

II. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Figura 2: Cronologia de eventos relevantes na temática de mudança do clima..... 30

DESENVOLVIMENTO

III. ESTUDO A | DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND: DESAFIOS, CUSTOS, TECNOLOGIAS E PERSPECTIVAS

Figura 1: Fluxograma PRISMA..... 40
Figura 2: Mapa de calor das palavras-chave dos artigos selecionados..... 41
Figura 3: Estratégias principais e nível de complexidade para a descarbonização da cadeia do cimento à da construção civil..... 43
Figura 4: Uso de MCS na última década (a) e projeção do uso de ligantes (b)..... 46
Figura 5: Esquema do processo industrial do clínquer com captura de carbono..... 51
Figura 6: Rotas estabelecidas para a neutralidade de carbono na cadeia do cimento e materiais cimentícios..... 62
Figura 7: Projeção para descarbonizar a indústria do Cimento Portland..... 63
Figura 8: Metas estabelecidas para 2050 e projeção de execução em 2030, para a neutralidade de carbono global cimenteiro..... 64
Figura 9: Resumo das estratégias e grau de implementação para descarbonização da cadeia do Cimento Portland..... 66

DESENVOLVIMENTO

IV. ESTUDO B | LOW-CARBON CEMENTS AND CONSTRUCTION DURABILITY: A SYSTEMATIC REVIEW

Figure 1: Correlation between global and Brazilian production outlooks and the clinker factor in cement…….. 84
Figure 2: a) Number of publications by year according to the successive keyword refinements; 87

(b) word cloud of terms occurring at least three times…….....
Figure 3: Summary of the implications of decarbonization in cement and the demands generated…… 95

DESENVOLVIMENTO

V. ESTUDO C | CUSTOS DE ABATIMENTO DO CO2 NO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO E SUA RELAÇÃO COM O MERCADO DE CARBONO

Figura 1: Etapas metodológicas da estimativa de custos do abatimento de CO_2 no CP, para o cenário brasileiro..... 108
Figura 2: Potencial de redução de CO_2 em função do grau de dificuldade para implementação das estratégias mapeadas e da estimativa de custo para implementação..... 120

APÊNDICE A

SUPPLEMENTARY MATERIAL – CAPÍTULO IV | ESTUDO B

Figure 1S: Prisma flow diagram..... 131

LISTA DE TABELAS

DESENVOLVIMENTO

III. ESTUDO A | DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND: DESAFIOS, CUSTOS, TECNOLOGIAS E PERSPECTIVAS

Tabela 1: Protocolo de busca dos artigos..... 40
Tabela 1: Características dos MCS e estratégias para correção ou mitigação..... 47

DESENVOLVIMENTO

IV. ESTUDO B| LOW-CARBON CEMENTS AND CONSTRUCTION DURABILITY: A SYSTEMATIC REVIEW

Table 1: Summary of the tests performed, and properties evaluated in the analyzed studies……. 92

DESENVOLVIMENTO

V. ESTUDO C| CUSTOS DE ABATIMENTO DO CO2 NO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO E SUA RELAÇÃO COM O MERCADO DE CARBONO

Tabela 1: Detalhamento dos itens que compõem a equação de MAC_{MCS}..... 111
Tabela 2: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{REATIVIDADE}$..... 112
Tabela 3: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{EFICIÊNCIA}$..... 112
Tabela 4: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{COMBUSTÍVEL}$..... 113
Tabela 5: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{CONSUMO}$..... 114
Tabela 6: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{PROJETO}$..... 115
Tabela 7: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{DURABILIIDADE}$..... 115
Tabela 8: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{CARBONATAÇÃO}$..... 116
Tabela 9: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{AGREGADOS}$..... 117
Tabela 10: Detalhamento dos itens que compõem a equação de MAC_{CCUS}..... 117
Tabela 11: Premissas para conversão em base clínquer..... 117
Tabela 12: Resultados obtidos em cenário e nivelados em base clínquer e agregados..... 119

APÊNDICE A

SUPPLEMENTARY MATERIAL – CAPÍTULO IV | ESTUDO B

Table 1S: Included articles……..… 132

Table 2S: Excluded articles..... 136
Table 3S: Search protocol..... 136
Table 4S: Summary of experimental studies and their methodological quality/ risk-of-bias assessment……..…. 137

APÊNDICE B

MATERIAL SUPLEMENTAR – CAPÍTULO V | ESTUDO C

Tabela 1S: Cálculos dos custos de abatimento das emissões..... 139
Tabela 2S: Premissas assumidas nos cálculos..... 142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AAR	Reação Álcali Agregado
ACV	Análise de Ciclo de Vida
Al	Alumínio
BIM	Modelagem da Informação da Construção
C_2S	Silicato Dicálcico - Belita
C_3A	Aluminato Tricálcico
C_3S	Silicato Tricálcico - Alita
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
$CaSO_4$	Sulfato de Cálcio
CCfD	Contrato de Carbono por Diferença
CCUS	Captura, Estocagem e Uso de Carbono
CDW	Resíduos de Construção e Demolição
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CPC	Cimento Portland Comum
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DAR	Captura Direta do Ar
DEF	Formação Etringita Tardia
DPP	Passaporte Digital de Produtos
EPS	Poliestireno Expandido
ETS	Sistema de Comércio de Emissões
GCCA	Associação Global de Cimento e Concreto
GJ	Giga Joules
Gt	Giga toneladas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LC3	Cimento de Calcário e Argila Calcinada
LCA	Avaliação do Ciclo de Vida
LHEC	Cimento Expansivo de Baixo Calor
MAC	Custo Marginal de Abatimento
MCS/ SCM	Materiais Cimentícios Suplementares
MgO	Óxido de Magnésio
MPa	Mega Pascal
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
ºC	Graus Celsius
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU	Organização das Nações Unidas
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
SIDAC	Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
t	Tonelada
USD/t agregados	Dólares Americanos por tonelada de agregados
USD/tCO_2	Dólares Americanos por tonelada de CO_2

SUMÁRIO

FUNDAMENTOS 19
I. INTRODUÇÃO 19
i. OBJETIVO 22
ii. JUSTIFICATIVA 22
III. ORIGINALIDADE 24
iv. ESTRUTURA DA PESQUISA 24
v. LIMITES DA PESQUISA 26
REFERÊNCIAS [CAPÍTULO I] 27

FUNDAMENTOS 30
II. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MATERIAIS CIMENTÍCIOS 30
REFERÊNCIAS [CAPÍTULO II] 33

DESENVOLVIMENTO 36
III. ESTUDO A | DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND 36
1. INTRODUÇÃO 37
2. METODOLOGIA 39
3. DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM MATERIAIS À BASE DE CP 42
3.1. MATERIAL: CIMENTO PORTLAND 43
3.1.1. Eficiência no processo produtivo 44
3.1.2. Substituição dos combustíveis nos fornos 45
3.1.3. Substituição do clínquer por materiais menos emissivos 46
3.1.4. Aumento da reatividade do clínquer 48
3.1.5. Captura, estocagem e utilização de carbono de carbono (CCUS) 50
3.2. PRODUTOS E SERVIÇOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO E ARGAMASSA 54
3.2.1. Otimização de processos e do consumo de cimento 55
3.2.2. Agregados menos emissivos 56
3.3. APLICAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS, PRODUTOS E PROCESSOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL 57
3.3.1. Concepção, projeto e redução de perdas 58

3.3.2. Aumento da durabilidade e redução das manutenções 60
4. CIMENTO PORTLAND ZERO CARBONO: POTENCIAL E LIMITAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL 61
5. TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS 64
6. CONCLUSÃO 67
REFERÊNCIAS [CAPÍTULO III] 69

DESENVOLVIMENTO 82
IV. ESTUDO B | LOW-CARBON CEMENTS AND CONSTRUCTION DURABILITY: A SYSTEMATIC REVIEW 82

DESENVOLVIMENTO 101
V. ESTUDO C | CUSTOS DE ABATIMENTO DO CO_2 NO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO 101
1. INTRODUÇÃO 102
2. O MERCADO DE CARBONO 105
3. METODOLOGIA 106
3.1. DEFINIÇÃO DO ESCOPO E ABORDAGEM METODOLÓGICA 109
3.2. MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO 109
3.3. DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS 109
3.4. LEVANTAMENTO DE DADOS PRODUTIVOS 110
3.5. EMISSÕES DE CO_2 110
3.6. ESTIMATIVA DOS CUSTOS DE ABATIMENTO DE CO_2 110
3.6.1. Substituição do clínquer por MCS 111
3.6.2. Aumento da reatividade do clínquer 111
3.6.3. Eficiência energética 112
3.6.4. Uso de combustíveis alternativos 113
3.6.5. Otimização de processos e consumo de cimento 114
3.6.6. Concepção, projeto e redução de perdas 114
3.6.7. Aumento da durabilidade 115
3.6.8. Carbonatação natural 116
3.6.9. Agregados menos emissivos 116
3.6.10. CCUS 117
3.7. NIVELAMENTO DOS RESULTADOS 118

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 118
5. CONCLUSÃO 123

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS 129

APÊNDICE A 131
SUPPLEMENTARY MATERIAL [CAPÍTULO IV | ESTUDO B] 131

APÊNDICE B 139
MATERIAL SUPLEMENTAR (CAPÍTULO V | ESTUDO C) 139

FUNDAMENTOS

I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são definidas como uma modificação de longo prazo do clima típico (Rovinaru *et al.*, 2023) e estão diretamente associadas à industrialização, pela crescente emissão de gases poluentes (Lan; Tans; Thoning, 2026). As evidências dos efeitos climáticos antropogênicos associados ao desenvolvimento industrial e à globalização tanto são verdadeiras que nos últimos cem anos há o registro de apenas cinco momentos em que as emissões de dióxido de carbono (CO_2) foram substancialmente diminuídas. Os eventos de redução de CO_2 são ligados à crise do petróleo (1975), crises financeiras (1982 e 2009), crise geopolítica (1990) e, a última delas em 2020, à época da pandemia mundial de COVID 19 (Climate Watch, 2024; ONU, 2024b). Essas cinco ocasiões têm em comum o fato de que a produção e/ou consumo foram reduzidos de forma significativa, o que corrobora que as ações antropogênicas têm influência direta nas emissões atmosféricas.

Não dissociado do desenvolvimento industrial está o aumento da população, a qual é estimada em 10 bilhões no ano de 2058 (ONU, 2024c). É inegável o fato de que as pessoas precisam de moradia, saneamento, transportes e infraestrutura em geral para uma vida digna, ao mesmo tempo em que a industrialização crescente também demanda alto volume de produtos e serviços associados à construção civil e largamente fabricados a partir de um material bastante utilizado ao redor do mundo: o concreto, haja vista suas características físicas e mecânicas. Tanto é que em 2020, do volume total de concreto produzido no mundo, 40% foi utilizado na construção de residências (GCCA, 2021). A principal matéria-prima do concreto é o cimento, material industrializado de maior consumo global (IEA; WBCSD; CSI, 2018).

Dados apontam que a indústria do cimento responde atualmente por cerca de 7% do total das emissões atmosféricas de CO_2, que equivalem a aproximadamente 3Gt por ano, com perspectiva de crescimento em torno de 4% até 2050, em função do aumento estimado de 12% no consumo global de cimento (GCCA, 2021; IEA, 2024). Apesar do crescimento projetado, a indústria cimenteira tem a meta de alcançar a neutralidade de carbono até 2050, o chamado *Net zero* (IEA; WBCSD; CSI, 2018).

Para atendimento das metas climáticas, a captura, estocagem e utilização do carbono (CCUS) é outra rota com contribuição de ao menos 40% em nível global. O desenvolvimento e aplicação extensivos dessa tecnologia estão previstos para o período entre 2030 e 2050 (Barbhuiya *et al.*, 2024; Cembureau, 2024b; GCCA, 2021; IEA, 2020) e tem como grandes desafios os elevados

custos de implantação e maturidade tecnológica. Outro enfoque está na redução no uso do clínquer, matéria-prima do CP, pois cerca de 65% das emissões de CO_2 procedem do processo de clinquerização (Possan, 2019). A estratégia é substituir parte significativa do clínquer por outros materiais menos emissivos, os chamados materiais cimentícios suplementares (MCS) (Lothenbach; Scrivener; Hooton, 2011; Scrivener; John; Gartner, 2018; SNIC; ABCP, 2019). Ainda que essa não seja uma ideia exatamente inovadora, pois o uso de alguns MCS já é feito há bastante tempo, os avanços nessa direção têm sido quanto aos novos tipos de MCS, assim como a elevação do percentual de substituição admitido. Neste ponto, restam dúvidas sobre o desempenho em serviço de tais cimentos.

A conexão entre a fabricação e o uso está em que, se a indústria cimenteira fornece ao consumidor um material menos emissivo, é preciso observar o comportamento, especialmente a durabilidade das construções produzidas com tal material. Assim, um cimento descarbonizado somente cumprirá sua contribuição efetiva na redução das emissões de CO_2 se uma construção feita a partir desse material tiver um ciclo de vida adequado, com atendimento à vida útil mínima requerida nas normas vigentes, tendo em conta as manutenções necessárias. Do contrário, uma falha prematura antecipa reconstruções, que geram novas emissões.

Também na fase de aplicação do cimento, o uso adequado dos materiais é um fator para reduzir as emissões: consumir menos cimento por metro cúbico de concreto ou argamassa. Estimativas indicam que a dosagem do cimento de obras autogeridas é de até 23% superior à realizada nas centrais dosadoras, para a mesma finalidade (SNIC; ABCP, 2019). O mercado de obras autogeridas é o grande consumidor de cimento ensacado, chamado de “consumo formiga”, que representou 64% do montante de cimento vendido no Brasil em 2023 (SNIC, 2023).

Porém, pela característica intrínseca a esse consumo pulverizado, as informações são dispersas e dificultam o avanço de estudos científicos mais aprofundados neste ponto. Mesmo com dados provenientes das centrais dosadoras, a análise integrada entre a fabricação e a aplicação do cimento é complexa, pois reúne atores e níveis de maturidade tecnológica distintos (Cembureau, 2024b; Sun *et al.*, 2025). Neste contexto, a fabricação dos materiais cimentícios descarbonizados requer tanto escalabilidade produtiva quanto viabilidade econômica, enquanto sua ampla adoção depende da confiança dos projetistas quanto à sua utilização. Em geral, por suas propriedades físico-químicas diferentes do CP convencional, esses cimentos exigem o uso de aditivos, que, no caso dos cimentos ensacados, idealmente devem ser incorporados ainda na indústria.

Para além da discussão sobre cimentos menos emissivos e seus impactos quando aplicados em materiais à base de cimento, sobretudo na vida útil, um tema transversal ao assunto é o mercado de carbono, ainda em consolidação. No Brasil a Lei nº 15.042/2024, que instituiu o Sistema

Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), foi aprovada mas carece de regulamentação, o que gera incertezas que afetam diretamente a indústria cimenteira. A ausência de regras claras sobre o teto de emissões, a alocação de permissões, os critérios de elegibilidade de créditos e, consequentemente, a indefinição quanto ao preço do carbono praticado pelo mercado comprometem o investimento a longo prazo, especialmente nas estratégias ainda pouco desenvolvidas, como é o caso da CCUS.

Apesar da adoção de CCUS ser considerada essencial para a neutralidade de carbono do CP, sua viabilidade econômica permanece comprometida, pois exige altos investimentos em infraestrutura de captura, transporte e armazenamento, somados aos custos operacionais. Sem um preço de carbono suficientemente alto, ou políticas de incentivos e financiamentos, essa rota dificilmente compete com alternativas economicamente mais vantajosas. Esse cenário evidencia a correlação entre a neutralidade e o mercado de carbono e ajuda a compreender o avanço em algumas rotas de descarbonização em detrimento de outras.

Ligadas ao mercado e à neutralidade de carbono, as metas ambientais precisam ser traduzidas em termos financeiros comparáveis, para serem observadas do ponto de vista custo-benefício. Conceitualmente, o custo de abatimento das emissões de CO_2 é a razão entre o valor presente do custo líquido de uma ação de mitigação, que considera os custos menos os benefícios econômicos diretos, frente a um cenário base, e a quantidade de emissões evitadas por essa ação(Helmcke *et al.*, 2025; Johnsson; Normann; Svensson, 2020; Kesicki; Ekins, 2012). Nessa lógica, é esperado que medidas com custo de abatimento negativo ou próximo de zero sejam adotadas primariamente, enquanto as ações com custos elevados dependem de subsídios ou do mercado de carbono para se tornarem viáveis. Apesar da existência dos *roadmaps* setoriais, são escassas as estimativas dos custos de abatimento das emissões no Brasil. Por isso, estimar tais custos no mercado brasileiro permite uma comparação em mesma base entre as ações de descarbonização, indicar a possível ordem e velocidade de implementação de cada uma e dimensionar o possível impacto sobre o preço do cimento. Neste contexto, ao analisar conjuntamente a produção e aplicação de cimentos menos emissivos, à luz dos custos da descarbonização e do mercado de carbono, proporciona uma visão integrada e estratégica da cadeia, para decisões alinhadas à neutralidade de carbono no cimento.

Diante da perspectiva de aumento no consumo do cimento enquanto se projeta zerar as emissões dessa indústria, esta tese tem como objetivo explorar o fluxo da descarbonização do CP, avaliando as estratégias aplicáveis e os custos de abatimento do CO_2 para o mercado brasileiro para a cadeia do cimento, do concreto e da construção civil.

i. OBJETIVO

Esta pesquisa visa analisar a descarbonização da construção a partir do fluxo do cimento Portland, desde o processo produtivo do material ao uso das estruturas de concreto, para compreender as tendências, a complexidade, os custos e os desafios e oportunidades do setor.

Quanto aos objetivos específicos, foram definidos:

a) Avaliar a produção do cimento Portland em conjunto com as cadeias do concreto e da construção, para identificar as estratégias e complexidade de descarbonização ao longo do fluxo do CP;
b) Analisar os estudos publicados na última década sobre cimentos de baixa emissão de CO_2, a fim de avaliar se a substituição do clínquer por MCS e ligantes alternativos influencia a durabilidade dos materiais cimentícios;
c) Estimar os custos de abatimento de CO2 na cadeia do CP no Brasil e relacionar os resultados com o mercado de carbono.

Os objetivos apresentados são aderentes às ênfases e linha de pesquisa do Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade (PPGIES), já aborda transversalmente a inovação tecnológica sustentável a partir do melhor uso dos recursos naturais disponíveis e da eficiência energética, com impactos econômicos, sociais e ambientais nos ambientes construídos e do planejamento urbano, ligados às tecnologias e processos sustentáveis.

ii. JUSTIFICATIVA

As justificativas desta pesquisa são ancoradas em várias áreas, especialmente na ambiental, na social, na econômica e na técnico-científica. Do ponto de vista ambiental, é inegável que as mudanças climáticas têm trazido consequências negativas. O aumento da temperatura global possivelmente seja o mais destacado, por todo o desequilíbrio que provoca, como as secas, as queimadas, as enchentes e outros eventos meteorológicos extremos (Copernicus, 2025, 2026; EBC, 2024; Fire Season Incident Archive, 2025; IPCC, 2018; NOAA, 2024). A indústria cimenteira, pauta deste trabalho, responde por aproximadamente 7% das emissões atmosféricas antropogênicas de CO_2 no mundo (IEA; WBCSD; CSI, 2018), ou seja, é um segmento que tem uma responsabilidade ambiental a cumprir no atendimento das metas climáticas.

Quanto à justificativa social, ela é transversal desde a produção até a utilização do

cimento. Em geral, nas ocorrências de eventos climáticos extremos, são as pessoas em situação de vulnerabilidade social quem mais sofrem com problemas de saúde como cólera, dengue e malária (IPCC, 2023). Os países do Sul Global, em sua grande maioria ainda em desenvolvimento, são os que mais demandam de infraestrutura e moradia dignas para as pessoas, ou seja, boa parcela do cimento que será produzido nos próximos anos é destinada a esses países (Scrivener; John; Gartner, 2018). Se o custo desse material não for acessível, o problema será ampliado (Hafez *et al.*, 2026a; Scrivener; John; Gartner, 2018; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023) e a perspectiva de justiça social, reduzida.

Os aspectos econômicos que motivam esta pesquisa são relacionados à produção e demanda do CP, a entrada de ligantes alternativos no mercado, ao uso de MCS e a possível competição por determinados materiais, além da circularidade e do extrativismo, que influenciam a disponibilidade e o custo das matérias-primas (Cembureau, 2023; Hafez *et al.*, 2026a; Ige; Olanrewaju, 2023; Kukreja *et al.*, 2023; Oluleye *et al.*, 2023). Entre esses aspectos, o destaque é para o mercado de carbono e sua relação com a indústria cimenteira, o que levanta questionamentos de que forma o custo ou o retorno da implantação das estratégias de descarbonização orientam a adoção dessas ações.

A justificativa técnico-científica é pela aderência do assunto a temas técnicos atuais e relevantes, que têm impacto em várias áreas da sociedade e estão diretamente ligados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da ONU, em especial ao *11: Cidades e comunidades sustentáveis*; *12: Consumo e produção responsáveis* e *13: Ação contra a mudança global do clima*. Assim, a pesquisa tem o olhar para a necessidade de avanços tecnológicos para o atendimento das metas do clima de forma conectada com a sociedade, sobretudo depois de pesquisas científicas afirmarem que, se não forem freadas, as mudanças climáticas são uma ameaça existencial (G1, 2025).

Há anos a indústria do cimento tem implementado ações com a finalidade de descarbonizar o setor. Ainda que convergentes, as ações propostas a nível mundial e Brasil não têm necessariamente o mesmo peso. As metas brasileiras, por exemplo, são bastante agressivas em relação à redução do teor de clínquer no cimento (SNIC; ABCP, 2019), enquanto tem menor representatividade no mercado norte americano (IEA; WBCSD; CSI, 2018). A literatura relata como as alterações nas características físico-químicas do cimento, bastante comuns nas últimas décadas, coincidem com o aumento no percentual das manifestações patológicas nas estruturas de concreto (Bentz; Sant; Weiss, 2008), ao mesmo tempo que pouco exploram as particularidades e efeitos relativos ao uso dos cimentos menos emissivos (Aïtcin, 2000; Natalli *et al.*, 2021). Neste contexto, a questão central deste estudo é avaliar os impactos da descarbonização, a partir do fluxo do cimento, na cadeia da construção especialmente na durabilidade das construções e a relação com o mercado de carbono.

iii. ORIGINALIDADE

A originalidade desta tese está concentrada na estimativa dos custos de abatimento do CO_2 no CP para o mercado Brasileiro, com base na metodologia Custo Marginal de Abatimento (MAC), com dados da cadeia produtiva nacional do cimento, do concreto e da construção. Para tanto, a tese foi construída com uma abordagem integrada das cadeias que envolvem o fluxo do CP, em uma combinação de revisões crítica e sistemática da literatura, coleta de dados secundários e estimativas dos custos de abatimento.

iv. ESTRUTURA DA PESQUISA

Com estrutura em formato de artigos, a tese é organizada em três seções: i) fundamentos (Capítulos I e II); ii) desenvolvimento (Capítulos III, IV) e iii) síntese (Capítulos V e VI), detalhados e resumidos na Figura 3:

d) No Capítulo I estão as linhas gerais da pesquisa, com a contextualização do assunto (introdução), explanação dos objetivos, justificativa, originalidade e estrutura geral;

e) O Capítulo II traz um panorama sobre as mudanças climáticas e os impactos já observados, o que reforça a necessidade de descarbonização no setor cimenteiro;

f) O Capítulo III é composto pelo estudo A, um artigo intitulado “Descarbonização da construção civil pelo fluxo do cimento Portland: desafios, tecnologias e perspectivas”. Nele, estão detalhadas as principais estratégias para descarbonização no nível material (Cimento Portland); produtos e serviços à base de cimento (concreto e argamassa) e a aplicação de materiais cimentícios, produtos e processos de diferentes cadeias (construção civil). Cada um dos segmentos foi explorado com relação às proposições, à efetiva contribuição no processo de descarbonização da cadeia, aos principais benefícios e desafios das ações, tanto no cenário internacional quanto nacional. Por fim, são abordados o potencial e as limitações para a neutralidade de carbono. A abordagem deste artigo é voltada ao primeiro objetivo específico;

g) O Capítulo IV é composto pelo estudo B, artigo, intitulado “*Low-Carbon Cements and Construction Durability: A Systematic Review*”. A revisão sistemática teve a finalidade de identificar o estado da arte e as tendências associadas aos cimentos de baixo carbono e sua correlação com a durabilidade das construções. A

abordagem visa responder ao segundo objetivo específico desta tese. Este artigo foi publicado na revista *Buildings*, na edição especial dos artigos selecionados no *XXII International Conference on Building Pathology and Construction Repair (CINPAR 2026)*;

h) No Capítulo V é apresentado o estudo C, artigo onde são estimados os custos de abatimento de CO_2 do CP no mercado brasileiro e apresentada a relação dessa variável com o mercado de carbono, com a finalidade de mostrar sua sensibilidade;

i) O Capítulo VI traz a conclusão da tese, com os principais achados, desafios e perspectivas no processo de zerar o carbono da indústria cimenteira até 2050, mapeados por meio deste trabalho. Ainda neste capítulo serão reunidos os principais pontos que podem nortear os planos estratégicos voltados ao atendimento das metas climáticas sob responsabilidade do setor cimenteiro.

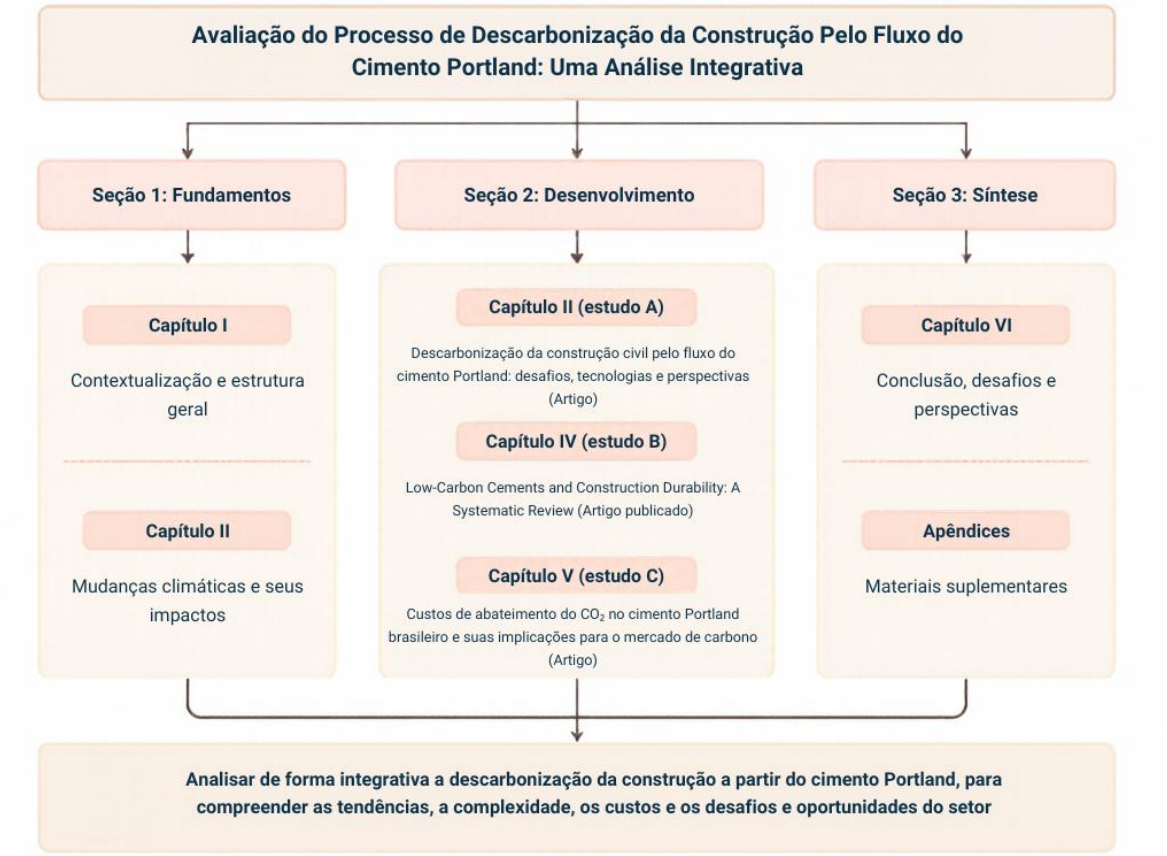


Figura 3: Resumo da estrutura da tese.

v. LIMITES DA PESQUISA

Os limites dessa pesquisa são inerentes aos métodos selecionados, pois como se trata de uma exploração teórica, somente dados produzidos por terceiros e disponíveis podem ser citados e utilizados. Ademais, a abrangência, qualidade e profundidade das informações publicadas, ainda que relevantes, nem sempre oferecem todos os requisitos necessários para que sejam comparadas entre si de forma consistente, ainda que abordem temáticas similares. Para os cálculos dos custos de abatimento no mercado brasileiro, muitas informações não foram localizadas de forma direta e, por isso, derivaram de cálculos a partir de informações públicas. Além disso, alguns dados de entrada localizados na literatura não são referentes ao mercado brasileiro, mas foram assumidos como um valor médio possível.

A integração entre os eixos desta tese é desafiadora e pode ser limitada à extensão dos dados disponíveis, sobretudo pelo fato de que ainda que os assuntos sejam discutidos por outros autores, normalmente os fazem de forma isolada. A proposição dos cenários de descarbonização 2030-2050 e as grandes implicações setoriais para a construção civil estarão condicionadas ao estado da arte das tecnologias atuais, suas perspectivas de aplicação e ao cenário mercadológico atual. Fatores globais eminentes que envolvem a geopolítica mundial, oscilações cambiais que impactem o preço do cimento, das estruturas, do mercado de carbono, entre outros, além do real posicionamento dos países em relação às metas climáticas fogem aos limites deste trabalho, ainda que seus potenciais efeitos não sejam ignorados e possam ser reconhecidos como incertezas nas análises.

REFERÊNCIAS [CAPÍTULO I]

AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research, vol. 30, no 9, p. 1349–1359, 2000.

BARBHUIYA, S. et al. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. Journal of Building Engineering, vol. 86, 2024.

BENTZ, D. P.; SANT, G.; WEISS, J. Early-Age Properties of Cement-Based Materials. I: Influence of Cement Fineness. Journal of Materials in Civil Engineering, p. 502–508, 2008.

CEMBUREAU. Clinker substitution in the cement industry. Brussels: 2024.

CEMBUREAU. The European Cement Association: Activity report. Bruxelas: 023. Disponível em: https://www.cembureau.eu/media/dnbf4xzc/activity-report-2023-for-web.pdf.

CLIMATE WATCH. Historial GHG Emissions. 2024. Disponível em: https://www.climate-watchdata.org/ghg-emissions?breakBy=regions&calculation=ABSOLUTE_VALUE&chartType=line&end_year=2022&gases=co2&regions=WORLD&source=PIK&start_year=1960. Acesso em: 27 ago. 2024.

COPERNICUS. 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level. 2025. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level. Acesso em: 15 ago. 2025.

COPERNICUS. Fire Emissions Watch. 2026. Disponível em: https://apps.atmosphere.copernicus.eu/fire-emissions-watch/. Acesso em: 31 jul. 2026.

EBC. Brasil concentra 71,9% das queimadas na América do Sul nas últimas 48h, 2024. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-09/brasil-concentra-719-das-queimadas-na-america-do-sul-nas-ultimas-48h. Acesso em: 15 set. 2024.

FIRE SEASON INCIDENT ARCHIVE. 2025. Disponível em: https://www.fire.ca.gov/incidents/2025. Acesso em: 30 jan. 2025.

G1. Corte Internacional conclui que as mudanças climáticas são “ameaça existencial”. 2025. Disponível em: https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2025/07/23/em-parecer-historico-o-tribunal-mundial-afirma-que-as-mudancas-climaticas-sao-uma-ameaca-existencial.ghtml. Acesso em: 5 ago. 2025.

GCCA. Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London: 2021.

HAFEZ, H. et al. Low-carbon concrete has the potential to meet global urban housing needs by 2050. Communications Sustainability, vol. 1, no 1, p. 28, 2026.

HELMCKE, S. *et al.* Understanding the price of decarbonization. McKinsey Quarterly, vol. 62, 2025.

IEA. CO_2 Emissions in 2023. 2024. Disponível em: www.iea.org.

IEA. Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture, Utilization and Storage. 2020.

IEA; WBCSD; CSI. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry International Energy Agency. 2018.

IGE, O. E.; OLANREWAJU, O. A. Comparative Life Cycle Assessment of Different Portland Cement Types in South Africa. Clean Technologies, vol. 5, no 3, p. 901–920, 2023.

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas. IPCC. 2018.

IPCC. Sumário para Formuladores de Políticas. Em: Mudança do clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de trabalho I, II e III para o Sexto relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Genebra, Suíça: 2023.

JOHNSSON, F.; NORMANN, F.; SVENSSON, E. Marginal Abatement Cost Curve of Industrial CO2 Capture and Storage – A Swedish Case Study. Frontiers in Energy Research, vol. 8, 2020.

KESICKI, F.; EKINS, P. Marginal abatement cost curves: a call for caution. Climate Policy, vol. 12, nº 2, p. 219–236, 2012.

KUKREJA, K. et al. Impact assessment of alternative fuels on production Cost, plant operation and Environment- case study of Indian cement industry. Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 57, p. 103300, 2023. Disponível em: Acesso em: 11 set. 2024.

LAN, X.; TANS, P.; THONING, K. W. Trends in globally-averaged CO2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. 2026.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, ENGLAND, vol. 41, no 12, p. 1244–1256, 2011.

NATALLI, J. F. et al. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 14, no 6, 2021.

NOAA. October 2024 Global Climate Report | National Centers for Environmental Information (NCEI). 2024. Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202410. Acesso em: 17 nov. 2024.

OLULEYE, B. I. et al. Modeling the principal success factors for attaining systemic circularity in the building construction industry: An international survey of circular economy experts. Sustainable Production and Consumption, vol. 37, p. 268–283, 2023.

ONU. The Sustainable Development Goals Report. New York: 2024a.

ONU. World Population Prospects 2024: Summary of Results. New York: 2024b.

POSSAN, E. CO2 uptake in cementitious materials. Concreto & Construções, vol. 95, p. 60–66,

2019.

ROVINARU, M. D. et al. Where Are We Heading? Tackling the Climate Change in a Globalized World. Sustainability (Switzerland), vol. 15, no 1, 2023.

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, vol. 114, p. 2–26, 2018.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, vol. 171, 2023.

SNIC. Relatório Anual. São Paulo: 2023.

SNIC; ABCP. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: 2019.

SUN, M. et al. Application, Challenges, and Prospects of CCUS Technology in Steel Industry. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2025.

FUNDAMENTOS

II. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O conceito de mudanças climáticas diz respeito às alterações a longo prazo, na temperatura e padrões do clima (Rovinaru *et al.*, 2023). Embora seja uma mudança que ocorra também naturalmente, as evidências comprovam que as atividades antropogênicas, em especial a queima de combustíveis fósseis que promove a geração de CO_2, são a principal causa da aceleração das mudanças climáticas (MCTIC, 2025; ONU, 2025). O fenômeno pelo qual gases como o CO_2 retêm parte da radiação térmica e elevam a temperatura média foi descrito em 1896 (Arrhenius, 1896) e constitui um conceito consolidado (IPCC, 2021). Na prática, quanto maior a concentração dos gases indesejados, maior o aquecimento. Foi especialmente a partir dos anos 60 que cientistas, autoridades e lideranças mundiais iniciaram ações para mitigar os efeitos já causados e frear o avanço das alterações climáticas, com proposições em busca de sustentabilidade ambiental (Rodrigues; Gerhardt, 2021; Touati; Ben-Salha, 2024). Conforme histórico da

Figura 4, o fenômeno do "efeito estufa" foi descrito em 1824 pelo físico francês Joseph Fourier (Bard; Chappellaz, 2010).

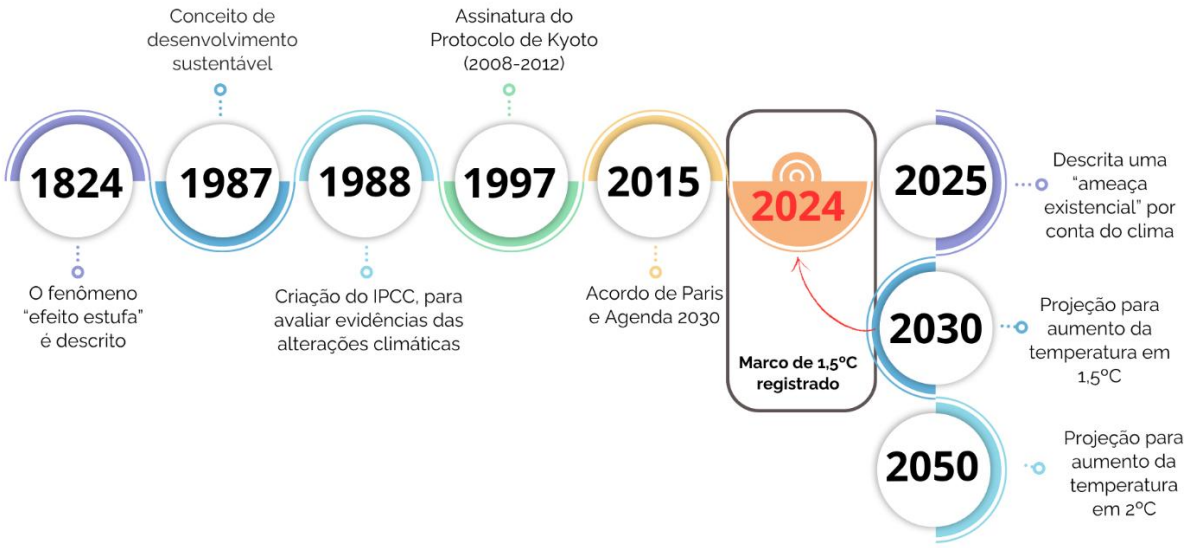


Figura 4: Cronologia de eventos relevantes na temática de mudança do clima.
Fonte: Adaptado de (Bard; Chappellaz, 2010; Copernicus, 2025; IPCC, 2018; Touati; Ben-Salha, 2024).

Em 1987, por meio do Relatório de Brundtland, o conceito de desenvolvimento sustentável foi proposto como "aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades" (Brundtland; et al., 1987). O

IPCC, que em português significa “Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas” foi criado em 1988 para avaliar evidências acerca das alterações climáticas e estabeleceu-se como uma das maiores forças globais voltadas ao combate das mudanças climáticas (IPCC, 2024). Em 1997 foi assinado o Protocolo de Kyoto, no qual trinta e sete países desenvolvidos e mais a União Europeia se comprometeram a reduzir ou limitar emissões no período entre 2008 e 2012 (Metz *et al.*, 2007). Em 2015 foi pactuado o Acordo de Paris, no qual cento e noventa e cinco países se comprometeram a reduzir as emissões de gases poluentes (ONU, 2015; UNFCCC, 2015). Foi ainda em 2015 que a ONU (Organização das Nações Unidas) propôs dezessete ODS, com a finalidade de unir os países em ações efetivas para que até 2030 houvesse a erradicação da pobreza e a proteção do planeta, com o desenvolvimento equilibrado dos pontos de vista ambiental, social e econômico (UNDP, 2024).

O relatório do IPCC registrou em 2018 que a temperatura global, quando comparada aos níveis pré-industriais, subiu 1,0ºC (IPCC, 2018). Em 2024, pela primeira vez, um ano inteiro superou a marca de 1,5ºC acima desse patamar (Copernicus, 2025), evento que o Acordo de Paris busca evitar. O IPCC projeta essa meta para o período entre 2030-2035 (IPCC, 2018), mas o registro antecipado em um ano, ainda que isolado, sinaliza que ações de descarbonização de grande impacto precisam ser tomadas com urgência. Muito embora a partir do Acordo de Paris várias medidas que visem reverter esse cenário foram tomadas, outras foram adiadas para novas discussões, como por exemplo, um acordo sobre o mercado de carbono e por isso especialistas já consideram improvável o cumprimento das metas até 2030 (Nyirenda, 2023).

As evidências mostram que o mês de junho de 2026 foi o segundo mais quente em 177 anos, com temperatura da superfície global de 1,09ºC, atrás apenas do mês de junho de 2024, o mais quente já registrado, com registro de 1,22ºC acima da média do século XX (NOAA, 2026). O último registro para as temperaturas no mês de junho abaixo da média ocorreu em 1976 (NOAA, 2026). Esses sucessivos recordes reforçam a trajetória de aquecimento já abordada. Os compromissos feitos pelos países desenvolvidos, ao longo do tempo, para financiamento e ações para mitigar emissões atmosféricas não têm sido cumpridos em sua totalidade (Nyirenda, 2023; Watts *et al.*, 2018). O relatório da ONU de 2024 indica que apenas 17% das metas estabelecidas para os ODS estão no caminho de serem cumpridas (ONU, 2024a). Em um cenário em que 76% das emissões atmosféricas são de responsabilidade de dez nações, incluindo a União Europeia, das quais seis também estão no grupo das maiores economias mundiais (UNEP, 2024a), fica claro que decidir entre o crescimento econômico, com impacto ambiental, e ações para a melhora do planeta não é uma tarefa simples (Nyirenda, 2023). Adicionalmente, apesar das evidências científicas da necessidade de reduzir as emissões, o tema se torna sensível e pode ser deixado em segundo plano quando se confronta com ideais políticos ou interesses econômicos de empresas de grande influência, entre elas, as cimenteiras.

A principal consequência do aquecimento global é o desequilíbrio generalizado na atmosfera, nos oceanos, na criosfera e na biosfera, com reflexos por meio de fenômenos climáticos e meteorológicos extremos ao redor do mundo (Copernicus, 2025). Plataformas de monitoramento em tempo real, como a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e *Copernicus Climate Change Service* permitem verificar eventos climáticos extremos e suas consequências quase em tempo real (Copernicus, 2026; NOAA, 2026). Isso foi possível, por exemplo, no Brasil: no fim do mês de abril e início de maio de 2024, chuvas torrenciais acometeram o estado do Rio Grande do Sul, deixando milhares de desabrigados, 182 mortos e estragos sem precedentes (Caleffi *et al.*, 2024; NOAA, 2024). No mesmo ano, as queimadas destruíram 30 milhões de hectares no Brasil, atingindo especialmente os biomas Amazônia e Cerrado (MapBiomas, 2025). A ocorrência desses eventos foi associada às mudanças climáticas observadas (MapBiomas, 2025; Marengo *et al.*, 2024).

As pesquisas e as evidências apresentadas indicam registros crescentes de fenômenos meteorológicos extremos (Copernicus, 2025), que além das mortes e danos psicológicos, impedem as pessoas de trabalhar, destroem plantações e causam prejuízos financeiros em geral. Em geral, o grupo populacional que menos contribuiu historicamente para as mudanças climáticas, majoritariamente nos países menos desenvolvidos, é o mais atingido pelos eventos extremos, como ondas de calor, de frio, ciclones, queimadas e enchentes (IPCC, 2018, 2023). O registro e discussão acerca dessas evidências reforçam a necessidade de investimentos como uma forma de mitigar efeitos que já existem das alterações climáticas, pois são as pessoas de comunidades vulneráveis que sofrem mais impactos, como a perda de habitação, insegurança alimentar, pobreza, migração em massa e doenças (Watts *et al.*, 2018).

Promover condições adequadas de moradia é um desafio, especialmente para os países do sul global. A perspectiva de aumento populacional, necessidade de urbanização e busca por um mundo mais justo, em um ambiente no qual 68% das pessoas vivem nas cidades, traz consigo uma demanda crescente por cimento (IEA; WBCSD; CSI, 2018; Marsh *et al.*, 2024; Scrivener; John; Gartner, 2018), e evidencia um paradoxo: o mesmo material utilizado para promover moradias tem contribuição de aproximadamente 7% (GCCA, 2021) nas emissões de carbono, o que torna desejável, do ponto de vista ambiental, a redução do seu consumo. Contudo, é de difícil substituição e não há outro ligante altamente disponível e de baixo custo para substituí-lo por completo nas próximas décadas (Scrivener; John; Gartner, 2018; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023), e para muitas aplicações sequer há um substituto na atualidade. Como a demanda tende a crescer e o material não é, por ora, substituível, a questão-chave é como produzir cimento e fazer construções com redução nas emissões, o que coloca a descarbonização do setor em debate e é o tema central desta tese.

REFERÊNCIAS [CAPÍTULO II]

ARRHENIUS, S. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. Philosophical Magazine and Journal of Science Series, vol. 41, p. 237–276, 1896.

BARD, Edouard.; CHAPPELLAZ, J. Sur les origines de l'effet de serre et du changement climatique. La Ville brûle, 2010.

BRUNDTLAND, G. H.; ET AL. Our Common Future; by world commission on environment and development. 1987.

CALEFFI, F. et al. The impacts of extreme weather events: a comprehensive analysis of the 2024 floods in Rio Grande do Sul. Redes, vol. 29, 2024.

COPERNICUS. 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level. 2025. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level. Acesso em: 15 ago. 2025.

COPERNICUS. Fire Emissions Watch. 2026. Disponível em: https://apps.atmosphere.copernicus.eu/fire-emissions-watch/. Acesso em: 31 jul. 2026.

GCCA. Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London: 2021.

IEA; WBCSD; CSI. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement IndustryInternational Energy Agency. 2018.

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas. IPCC. 2018.

IPCC. Climate Change 2021 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: United Press, 2021. Disponível em: www.ipcc.ch.

IPCC. IPCC - History. 2024. Disponível em: https://www.ipcc.ch/about/history/. Acesso em: 28 ago. 2024.

IPCC. Sumário para Formuladores de Políticas. Em: Mudança do clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de trabalho I, II e III para o Sexto relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Genebra, Suíça: 2023.

MAPBIOMAS. RAF 2024: Relatório Anual do Fogo. São Paulo: 2025.

MARENGO, J. A. et al. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. Estudos Avancados, vol. 38, no 112, p. 203–227, 2024.

MARSH, A. T. M. et al. Inequalities in the production and use of cement and concrete, and their consequences for decarbonisation and sustainable development. Environmental Research: Infrastructure and Sustainability, vol. 4, no 3, 2024.

MCTIC. Temperatura média do planeta rompe limite de 1.5°C em 2024, apontam centros meteorológicos. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/01/temperatura-media-do-planeta-rompe-limite-de-1-5degc-em-2024-apontam-centros-meteorologicos. Acesso em: 30 jan. 2025.

METZ, B. et al. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. United Kingdom and New York: 2007.

NOAA. NOAA National Centers for Environmental Information, Monthly Global Climate Report for June 2026. 2026. Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202606. Acesso em: 25 jul. 2026.

NOAA. October 2024 Global Climate Report | National Centers for Environmental Information (NCEI). 2024. Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202410. Acesso em: 17 nov. 2024.

NYIRENDA, H. Fiddling at the conference of the parties? Peeping into the highs and lows of the post-Kyoto climate change conferences: a review on contexts, decisions and implementation highlights. Springer Science and Business Media B.V., 2023.

ONU. Acordo de Paris sobre o Clima. 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima. Acesso em: 27 ago. 2024.

ONU. Climate Action. 2025. Disponível em: https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change. Acesso em: 30 jan. 2025.

ONU. Resolve - Report of the Secretary-General on the Work of the Organization. New York: 2024. Disponível em: http://shop.un.org.

RODRIGUES, T. O.; GERHARDT, J. ROADMAP ODS 12: uma rota para a sustentabilidade. p. 27, 2021.

ROVINARU, M. D. et al. Where Are We Heading? Tackling the Climate Change in a Globalized World. Sustainability (Switzerland), vol. 15, no 1, 2023.

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, vol. 114, p. 2–26, 2018.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, vol. 171, 2023.

TOUATI, K.; BEN-SALHA, O. Reconsidering the Long-Term Impacts of Digitalization, Industrialization, and Financial Development on Environmental Sustainability in GCC Countries. Sustainability (Switzerland). vol. 16, no 9, 2024.

UNDP. Sustainable Development Goals. 2024. Disponível em: https://www.undp.org/sustainable-development-goals. Acesso em: 26 ago. 2024.

UNEP. Executive summary. In Emissions Gap Report 2024: No more hot air … please! With a

massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2024. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404.

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its Twenty-First Session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Paris: 2015.

WATTS, N. et al. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. Lancet Publishing Group, 2018.

DESENVOLVIMENTO

III. ESTUDO A | DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND

Este capítulo é composto pelo estudo A, voltado à identificação das principais estratégias de descarbonização ao longo da cadeia do CP, desde a produção do cimento e do concreto até a aplicação dos materiais cimentícios na construção civil. Para isso, foram combinadas estratégias de pesquisa qualitativas e quantitativas, complementares e sequenciais, compostas por busca bibliográfica nas bases *Scopus* e *Web of Science*, seleção e hierarquização de 100 artigos por meio da metodologia Methodi Ordinatio, análise bibliométrica com o pacote Bibliometrix e revisão integrativa, com a incorporação de documentos técnicos e relatórios setoriais.

A análise foi estruturada em três níveis da cadeia produtiva: o material (cimento Portland), os produtos e serviços à base de cimento (concretos e argamassas) e a aplicação desses materiais na construção civil. Para cada estratégia foram abordados os aspectos técnicos associados, além dos desafios e oportunidades mapeados. Os cenários global e brasileiro foram contrastados, quanto às estratégias elencadas e o percentual de contribuição atribuído a cada uma delas, visando a neutralidade de carbono em 2050. O estudo foi estruturado em formato de artigo, o qual é apresentado na sequência.

DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELO FLUXO DO CIMENTO PORTLAND: DESAFIOS, TECNOLOGIAS E PERSPECTIVAS

Juliana Gaio Somer[1]; Edna Possan[2]

[1] Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, julianagaiosomer@gmail.com
[2] Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, epossan@gmail.com

Resumo:

A necessidade de descarbonização do setor da construção civil é primordial para o alcance das metas do clima, mas representa um desafio significativo por conta da complexidade e dimensão da cadeia produtiva. O objetivo deste estudo foi identificar as principais estratégias de descarbonização ao longo da cadeia do Cimento Portland. O método foi composto por abordagens qualitativas e quantitativas, complementares e sequenciais, baseadas em revisão integrativa da literatura (*Scopus* e *Web of Science*) e documentos técnicos setoriais, com ênfase em 2015-2026. Os 100 artigos-núcleo foram selecionados com uso do *Methodi Ordinatio,* processados por meio do pacote Bibliometrix, os quais, juntamente com publicações técnicas, científicas e relatórios setoriais, compuseram a revisão integrativa. Foram exploradas as dez principais estratégias de descarbonização do setor. Os resultados indicam que a complexidade de implementação das estratégias aumenta ao longo da cadeia: maior na construção e decrescente até a produção do cimento. Nas cadeias do concreto e da construção, as reduções de CO_2 estão associadas ao projeto, à seleção de materiais, à redução de perdas e ao aproveitamento de resíduos. Na cadeia do cimento, o uso de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) no Brasil pode responder por até 69% das emissões evitadas pelo setor, o que justifica seu avançado estágio de implementação. No cenário global, a adoção de CCUS pode responder por até 42% da meta de descarbonização, contudo, a projeção é que 70% do avanço desta rota deva ocorrer entre 2030 e 2050. No cenário brasileiro as estratégias já implantadas concentram-se na indústria cimenteira. O desafio remanescente está nas frentes não completamente consolidadas, como o desenvolvimento e validação de tecnologias de CCUS em escala comercial; a avaliação do impacto da redução do teor de clínquer e dos MCS emergentes sobre a durabilidade das construções e a mensuração efetiva da redução das emissões evitadas ao longo do ciclo de vida.

Palavras-chave: Durabilidade; Concreto convencional; Matrizes à base cimento; Baixo carbono; Redução do teor de clínquer; Redução de emissões.

1. INTRODUÇÃO

A industrialização global, desencadeada no século XVIII transformou profundamente a sociedade ao ampliar o acesso à energia, materiais e infraestrutura, além de viabilizar o desenvolvimento de tecnologias fundamentais, como o Cimento Portland (CP). Todavia, a partir do século XX são notórios os impactos ambientais decorrentes das emissões de dióxido de

carbono (CO_2), associadas a processos produtivos intensivos em energia com uso predominante de combustíveis fósseis (Friedlingstein *et al.*, 2020; IPCC, 2018). Desde o período pré-industrial, a concentração atmosférica de CO_2 aumentou de 278 ppm no fim do século XVIII para 429 ppm em março de 2026 (Lan; Tans; Thoning, 2026). Paralelamente, o crescimento populacional, estimado em 1 bilhão de pessoas no início do século XIX subiu para 8 bilhões em 2024, com projeção de 10 bilhões em 2058 (ONU, 2024c), que intensifica a demanda por infraestrutura, transporte e moradia.

Ao longo da história recente, em apenas cinco eventos globais: crises econômicas, colapsos geopolíticos e a pandemia de Covid-19, resultaram em reduções temporárias das emissões de CO_2, o que comprova que tais quedas estão associadas à desaceleração abrupta das atividades humanas e não às transformações estruturais (Fankhauser *et al.*, 2022; WRI, 2026).

O CP, principal matéria-prima para produção de argamassas e concretos, é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo (IEA; WBCSD; CSI, 2018), devido à disponibilidade, versatilidade (Chen, Hao *et al.*, 2025) e seu papel essencial na construção de edificações e obras de infraestrutura (Griffiths *et al.*, 2023; IEA; WBCSD; CSI, 2018; Scrivener; John; Gartner, 2018; Supino *et al.*, 2016). Mundialmente, a indústria cimenteira responde por mais de 7% das emissões antropogênicas de CO_2 (IPCC, 2005). No Brasil esse valor é de 2,3% (SNIC; ABCP, 2019), reflexo majoritário do uso consolidado de materiais cimentícios suplementares (MCS) em substituição ao clínquer. Ainda assim, as emissões atmosféricas associadas ao concreto advêm majoritariamente do CP, que responde por até 90% do CO_2 emitido (ETC, 2018; Vishwakarma; Ramachandran, 2018), principalmente devido à decomposição térmica do calcário (carbonato de cálcio – $CaCO_3$), responsável por 65% das emissões, bem como à queima de combustíveis fósseis nos fornos de clinquerização (Guo *et al.*, 2023; Possan, 2019; SNIC; ABCP, 2019; Sousa; Bogas, 2021).

Embora a indústria cimenteira concentre a maior parcela das emissões atmosféricas diretas, o desempenho ambiental final depende de múltiplos agentes da cadeia do cimento, desde os fabricantes de concreto, projetistas, construtoras, operadores logísticos até os usuários finais. Estratégias de otimização de projetos estruturais (Miller *et al.*, 2025; Watari *et al.*, 2022), aumento da durabilidade (Adesina; Zhang, 2024; Di Ruocco, 2024; Papamichael *et al.*, 2023), redução de perdas, industrialização de processos e escolha de materiais menos intensivos em carbono (Alaux *et al.*, 2025; Broer; Simjanovic; Toth, 2022) são igualmente relevantes para a neutralidade de carbono. Por isso, a descarbonização do CP deve ser compreendida como um desafio sistêmico, que envolve integrações entre as diferentes etapas da cadeia da construção.

Entretanto, a abordagem do assunto na literatura científica costuma ser fragmentada, voltada às cimenteiras, ao concreto ou às construções. Essa fragmentação limita a

análise das interdependências tecnológicas, econômicas e regulatórias que compõem o fluxo do CP, desde sua produção até a aplicação final. A ausência de estudos integrados que conectem essas cadeias sob a perspectiva da redução das emissões constitui uma lacuna relevante no estado da arte, que motivou esta pesquisa. Este estudo busca preencher uma lacuna ao reunir, em uma análise crítica e integrada, as estratégias, os desafios e as oportunidades para a redução das emissões no setor. Baseado na literatura científica e em documentos técnicos setoriais, o artigo compila e analisa criticamente as principais rotas e seus avanços recentes, contrastando os cenários global e brasileiro.

Em alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 – Cidades e comunidades sustentáveis; 12 – Consumo e produção responsáveis e 13 – Ação contra a mudança global do clima, as principais contribuições do estudo incluem a proposição de uma visão sistêmica para a neutralidade de carbono na cadeia do CP, nacional e internacional e a integração entre diferentes níveis da cadeia.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido a partir da combinação de abordagens metodológicas qualitativas e quantitativas, complementares e sequenciais. Com a finalidade de identificar as principais estratégias voltadas à descarbonização ao longo da cadeia de produção e utilização do CP, foi realizada uma busca bibliográfica ampla, análise bibliométrica, seleção de artigos (Page *et al.*, 2022) e Methodi Ordinatio (Pagani; Kovaleski; Resende, 2015), seguidas da revisão integrativa (Torraco, 2016).

Na primeira etapa foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica, sem recorte temporal nas bases indexadas *Scopus* e *Web of Science (WoS)*, contemplando publicações em inglês e de relevância científica associadas à temática de descarbonização pelo fluxo do CP. Foram buscados os termos e combinações: "*Portland Cement*", "*clinker reduction*", "*decarbonization*", "*low carbon*", "*low* CO_2", "*low emissions*", "*supplementary cementitious materials*", "*cement industry*" e "*carbon capture*", combinados com os operadores booleanos "AND" e "OR", além do curinga "*". Esta pesquisa resultou em 6.587 documentos, que após exclusão das publicações duplicadas e/ou excluídos pela ausência de termos definidos e aderência ao campo de pesquisa, resultaram em 1.578 publicações. O detalhamento da combinação das palavras-chave é apresentado na Tabela 3.

Tabela 1: Protocolo de busca dos artigos

Data-base	Search string	Search fields	Search date	Articles
WoS	Portland Cement AND *Clinker reduction* Portland Cement AND Decarbonization Portland Cement AND *Clinker reduction AND Suplementary cementitio* material** Portland Cement AND *Suplementary cementitio* material** Clinker reduction AND Cement Industr*	Topic (Title; Abstract; Key-words)	15/03/2026	3.536
Scopus	Clinker reduction AND CCUS Portland Cement OR *Clinker reduction AND* "L*ow carbon*" OR "L*ow CO_2*" OR "L*ow emissions*" Portland Cement AND Cement industry* AND CCUS	Title; Abstract; Keywords		3.051

No conjunto de publicações selecionadas foi definido um núcleo de publicações prioritárias, com o *Methodi Ordinatio* (Pagani; Kovaleski; Resende, 2015). Os requisitos de fator de impacto do periódico, número de citações e ano da publicação são combinados na equação *InOrdinatio*. O ano da publicação (2015-2026) teve peso máximo na equação, dado pela linha temporal desde a assinatura do Acordo de Paris até o momento da pesquisa. A identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos está resumida no fluxograma PRISMA apresentado na Figura 5. A linha de corte estabelecida foi para os 100 artigos melhor ranqueados.

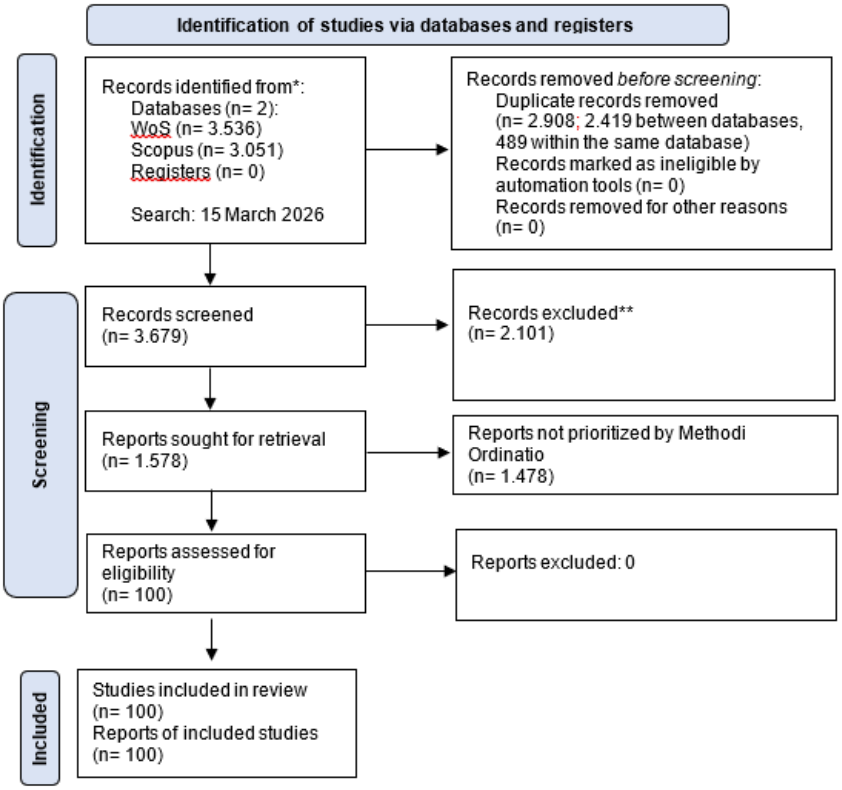


Figura 5: Fluxograma PRISMA.
Fonte: Adaptado de Page et al., 2022.

Na sequência, foi realizada a análise bibliométrica. Os indicadores observados foram: a evolução da produção científica por ano, a frequência e evolução temporal das palavras-chave. O processamento e análise dos dados bibliográficos foram realizados a partir dos metadados exportados das bases supracitadas, com uso do ambiente R, por meio do pacote Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017). Essa análise forneceu embasamento para a organização temática e a visualização das tendências de pesquisa. As informações relativas às palavras-chave, sua frequência e evolução temporal foram agrupadas em um mapa de calor, com dados normalizados por meio da padronização Z-*score*, para cada termo de forma global. As palavras-chave foram agrupadas por semelhança temática, para melhor visualização na Figura 6.

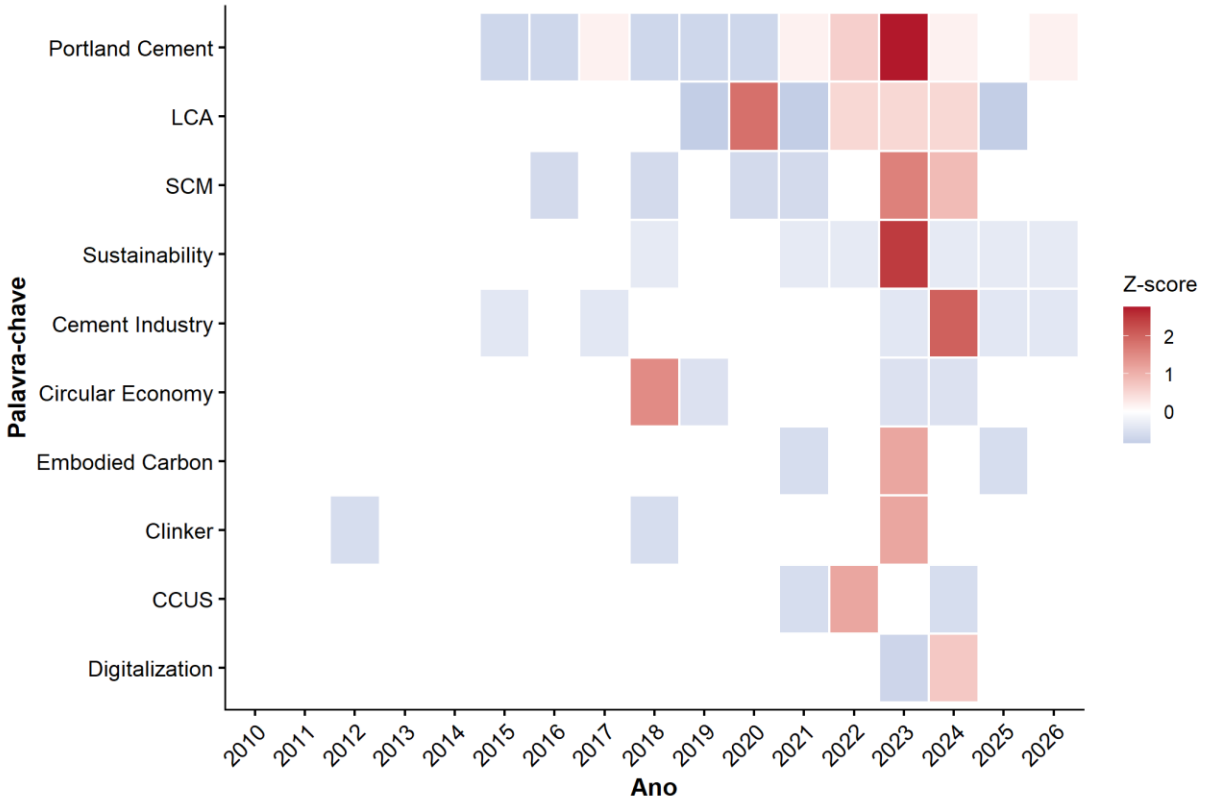


Figura 6: Mapa de calor das palavras-chave dos artigos selecionados.

A concentração das pesquisas ocorre no período entre 2022 e 2024, período no qual os termos *Portland Cement*, *Sustainability* e *SCM* se destacam, o que reflete o interesse na substituição parcial do clínquer. A análise do ciclo de vida (LCA) tem ocorrências a partir de 2019, o que indica uma tendência de observar as construções ao longo da vida útil. Os termos CCUS e *digitalization* aparecem a partir de 2021, o que revela uma fronteira nas pesquisas sobre neutralidade de carbono. A menor ocorrência no ano de 2026 se justifica por ser o ano corrente.

A terceira etapa foi a revisão integrativa (Torraco, 2016), que abrangeu tanto os artigos selecionados na etapa anterior quanto publicações técnicas, científicas e relatórios setoriais relevantes para a indústria cimenteira, adicionados ao longo do processo de leitura e aprofundamento do tema. As categorias de análise foram estabelecidas de acordo com a cadeia produtiva no nível de: i) material – Cimento Portland; ii) produtos e serviços à base de cimento (concreto) e iii) aplicação dos materiais cimentícios, produtos e processos (na construção civil).

3. DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM MATERIAIS À BASE DE CP

A descarbonização da construção, alinhada à meta "Net zero 2050" deve ser compreendida como um processo sistêmico, que abrange aspectos técnicos para as ações sociais, políticas e econômicas (Griffiths *et al.*, 2023), que permeia de forma interdependente os setores regulatório, produtivo e mercado consumidor. Para descarbonizar é necessário reduzir gradualmente as emissões atmosféricas de CO_2 dos produtos e processos, em conjunto com estratégias de redução, compensação e remoção de carbono (Fankhauser *et al.*, 2022). Entretanto, a operacionalização dessas estratégias envolve interconexões tecnológicas, econômicas e regulatórias, que dificultam sua implementação isolada e reforçam a necessidade de abordagens integradas.

Por conta dos seus elevados impactos ambientais, o setor da construção civil é considerado chave no caminho da descarbonização (Oguntola; Simske, 2023). No entanto, sua estrutura composta por múltiplas cadeias produtivas limita a implementação de estratégias coordenadas e caracteriza o setor como altamente complexo. Assim, neste estudo o fluxo do CP é analisado como uma unidade analítica sistêmica, o que permite avaliar as interdependências entre os diferentes níveis da cadeia.

Conforme apresentado na Figura 3, a descarbonização foi avaliada: i) direta e exclusiva na indústria cimenteira, haja vista a sua expressiva contribuição para as emissões; ii) a partir do concreto e das argamassas, por serem as principais aplicações diretas do cimento; iii) na construção civil de modo geral, onde os materiais à base de cimento são colocados em uso.

A Figura 3 enfatiza que grau de complexidade das estratégias de descarbonização aumenta da cadeia primária (indústria do cimento) para a cadeia de aplicação dos materiais cimentícios (construção civil), com a cadeia de concreto e argamassas em um estágio intermediário. O nível de industrialização decresce na mesma ordem. Essa assimetria é evidenciada nas diferentes estratégias de descarbonização em cada cadeia.

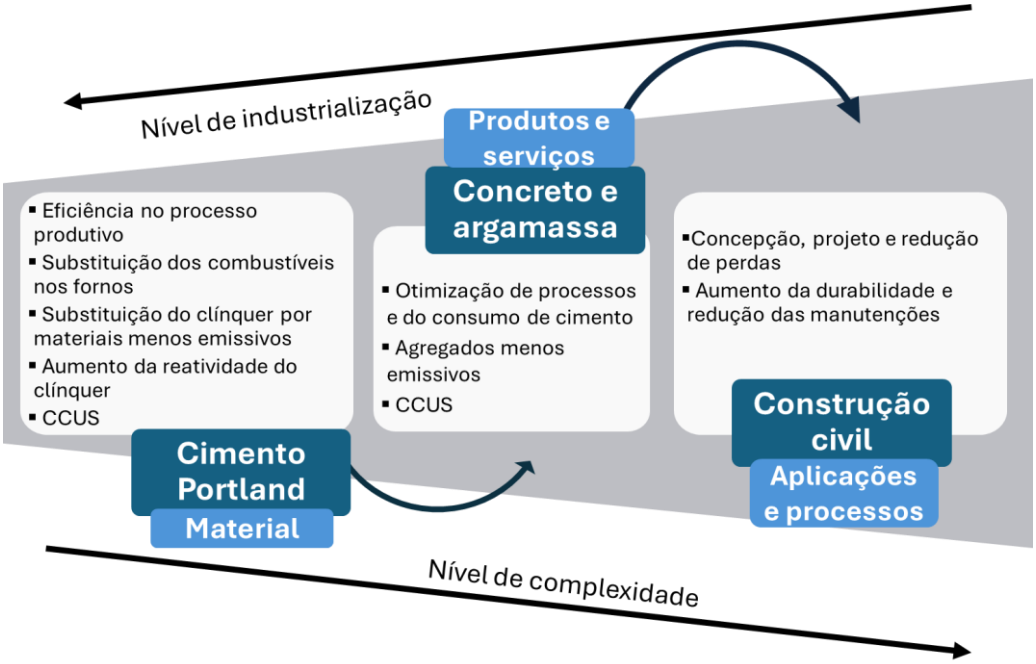


Figura 3: Estratégias principais e nível de complexidade para a descarbonização da cadeia do cimento à da construção civil.

Na indústria do cimento, foram mapeadas como principais estratégias de descarbonização a eficiência do processo produtivo, a substituição dos combustíveis nos fornos, a substituição de parcela do clínquer MCS, aumento da reatividade do clínquer, e as tecnologias de captura, estocagem e utilização de carbono (CCUS). O CCUS também se aplica à cadeia do concreto e argamassa, juntamente com a otimização de processos e do consumo de cimento e uso de agregados menos emissivos. Na cadeia da construção civil as mudanças na concepção e projetos, o uso de materiais menos emissivos e o aumento da durabilidade com redução das manutenções são elencadas como estratégias de maior contribuição para a neutralidade de carbono.

3.1. MATERIAL: CIMENTO PORTLAND

De acordo com o Banco de Dados Global dos Ativos de Produção de Cimento, em 2021 havia 3.117 indústrias da cadeia do cimento (McCarten *et al.*, 2021), com produção registrada de 4,03Gt em 2023 (Cembureau, 2024a). Essa produção equivale entre 2,4 e 2,6Gt de CO_2 emitido (IEA; WBCSD; CSI, 2018; Wu *et al.*, 2023). Face a esse volume de emissões, nos últimos anos, órgãos reguladores, investidores e clientes têm pressionado a indústria cimenteira por ações concretas e mensuráveis em direção à descarbonização (Ige; Olanrewaju, 2023; Tuff *et al.*, 2021; Wang, Yu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2017). As principais estratégias das indústrias cimenteiras voltadas à neutralidade de carbono são apresentadas na sequência.

3.1.1. Eficiência no processo produtivo

O processo produtivo do CP consiste na mistura de matérias-primas naturais, principalmente o calcário ($CaCO_3$) e argila que depois de aquecidos entre 1.400 e 1.500ºC dão origem ao clínquer, o qual é finamente moído com sulfato de cálcio ($CaSO_4$), e pode receber ou não a adição de materiais cimentícios suplementares (MCS), como a cinza volante, escória de alto-forno, dentre outras possibilidades (Scrivener; John; Gartner, 2018; SNIC; ABCP, 2019; Supino *et al.*, 2016). De modo geral, as matérias-primas naturais utilizadas na fabricação do clínquer são de baixo custo e bastante disponíveis ao redor do mundo (Sbahieh; Zaher Serdar; Al-Ghamdi, 2023).

Cada tonelada de clínquer produzido consome entre 3 e 3,5 GJ de energia e emite entre 0,7 e 0,85 toneladas de CO_2 (Atmaca; Yumrutaş, 2014; Guo *et al.*, 2023; IEA, 2023; Ige; Von Kallon; Desai, 2024; Shah *et al.*, 2022). As oscilações nestes valores decorrem ao porte, à idade e à eficiência tecnológica das plantas industriais de cimento, cuja vida útil é de aproximadamente 40 anos. As indústrias mais antigas estão na Europa e Estados Unidos, enquanto China, Índia, África e América Latina têm plantas industriais mais novas e normalmente mais eficientes (Griffiths *et al.*, 2023; Levi; Pales; Gül, 2020).

A fabricação do cimento pode acontecer por diferentes rotas: via processo seco, mais moderno e menos emissivo; via úmido, ainda utilizado em algumas plantas, e suas subdivisões semissecos e semiúmidos (Ishak; Hashim, 2015; Oguntola; Simske, 2023). A disponibilidade das matérias-primas e o tipo de cimento em produção condicionam a rota adotada com impacto nas emissões de CO_2 (GCCA, 2021; L. Szabó *et al.*, 2003; Mehta; Monteiro, 2006). Modificações aplicáveis ao processo industrial já foram mapeadas e, juntas, podem representar redução de até 10% no consumo energético na produção do CP (ETC, 2019; Miller *et al.*, 2025). Dentre vinte distintas possibilidades de adequações industriais identificadas, os investimentos necessários têm taxa de retorno de dois anos (ETC, 2019). Como exemplo, a GCCA (GCCA, 2023) destaca a implantação de painéis fotovoltaicos por uma grande cimenteira norte-americana, com capacidade de suprir até 15% da demanda de energética do complexo industrial.

Entretanto, a eletrificação dos fornos para alcançar as temperaturas necessárias à clinquerização ainda demanda desenvolvimento tecnológico (Boehm *et al.*, 2023). Ao mesmo tempo, as cimenteiras têm aproveitado o calor residual dos fornos para geração de energia, com ganhos no processo produtivo (Barbhuiya *et al.*, 2024; Oguntola; Simske, 2023). Ferramentas de inteligência artificial têm sido incorporadas a esses processos, com a finalidade de otimizar as operações e reduzir as emissões de CO_2 (Fatahi *et al.*, 2023; Kaniappan Chinnathai; Alkan, 2023; Oguntola; Boakye; Simske, 2024; Singh *et al.*, 2026).

O monitoramento baseado em inteligência artificial aplicado aos motores, calcinadores e moinhos é uma oportunidade ainda pouco aproveitada com potencial de aplicação em curto e médio prazo (Barbhuiya *et al.*, 2024; Oguntola; Simske, 2023). De modo geral, as principais ações para eficiência do processo produtivo estão globalmente implantadas ou em fase de implementação (Barbhuiya *et al.*, 2024; Oguntola; Simske, 2023). O compartilhamento de informações e trabalho colaborativo entre as partes interessadas são fundamentais para replicar estratégias bem-sucedidas em outras cimenteiras (Barbhuiya *et al.*, 2024).

3.1.2. Substituição dos combustíveis nos fornos

A indústria cimenteira consome 5% da demanda energética global (Amran *et al.*, 2022). A substituição dos combustíveis fósseis dos fornos por resíduos, prática conhecida por coprocessamento é alinhado ao conceito de circularidade de materiais e contribui com a redução das emissões atmosféricas (Barbhuiya *et al.*, 2024; Beguedou *et al.*, 2023; Carpio *et al.*, 2008; Castañón *et al.*, 2021; Georgiopoulou; Lyberatos, 2018; Karagiannis; Ftikos; Nikolopoulos, 2008; Kukreja *et al.*, 2023; Scrivener; John; Gartner, 2018; Tunçez, 2020; Vasiliu *et al.*, 2023). Ainda que o coprocessamento emita CO_2, isso ocorre pela recuperação energética do material e promove a conservação de recursos naturais que seriam utilizados como combustíveis, além de reduzir o volume de resíduos em aterros sanitários (Ciobanu *et al.*, 2022).

Entre os materiais mais empregados estão biomassa, resíduos sólidos urbanos, derivados de pneus inservíveis, coque de petróleo e carvão vegetal (Beguedou *et al.*, 2023; Carpio *et al.*, 2008; Castañón *et al.*, 2021; Scrivener; John; Gartner, 2018). Apesar dos benefícios, existe uma preocupação sobre efeitos que os materiais do coprocessamento possam causar sobre a reatividade do clínquer (Georgiopoulou; Lyberatos, 2018).

Dados de coprocessamento indicam que na Polônia, Alemanha, República Tcheca e Áustria o percentual de combustível alternativo se aproxima de 70%, enquanto a média europeia é de 50%, a mundial de 16% e a brasileira de 32% (ABCP, 2024; GCCA, 2025a; IEA, 2022; Uliasz-Bocheńczyk; Deja; Mokrzycki, 2021). Essa prática depende de logística viável para resíduos com distribuição geográfica heterogênea, de adequações nos fornos e da legislação local, que inclui as emissões de poluentes na saída da chaminé dos fornos (Ciobanu *et al.*, 2022; Kawai; Osako, 2012; Kukreja *et al.*, 2023). O coprocessamento como estratégia efetiva de descarbonização ainda requer amadurecimento tecnológico e evidências das emissões evitadas, mas se caracteriza como uma rota adequada onde as políticas para destinação de resíduos sólidos estão bem estabelecidas.

3.1.3. Substituição do clínquer por materiais menos emissivos

A redução do fator de clínquer global no cimento de 0,65 em 2014 para uma meta de 0,6 em 2050, pode responder por até 37% da mitigação das emissões atmosféricas da cadeia do CP, que implica em menor consumo energético, na redução das emissões durante a clinquerização e na redução da extração de matérias-primas (Giergiczny, 2019; Guynn; Kline, 2015; IEA; WBCSD; CSI, 2018; Juenger; Siddique, 2015; Scrivener; John; Gartner, 2018; Snellings, 2016). O clínquer, principal material intermediário na fabricação do cimento tem sido parcialmente substituído por MCS, como a escória de alto forno, pó de calcário, de pedra ou de rochas vulcânicas e cinza volante (Griffiths *et al.*, 2023; IEA; WBCSD; CSI, 2018). A utilização desses MCS é global e consolidada, com custo associado relativamente baixo (GCCA, 2023; Scrivener; John; Gartner, 2018).

Dados atuais indicam que o uso industrial de MCS nos cimentos é em torno de 24% (GCCA, 2025a), o que é muito similar ao já utilizado há uma década, conforme ilustra a Figura 4a. Para os próximos anos, a perspectiva de aumento do uso de ligantes alternativos (Figura 4b) deve incrementar os investimentos no desenvolvimento e o uso de MCS (Apel *et al.*, 2024).

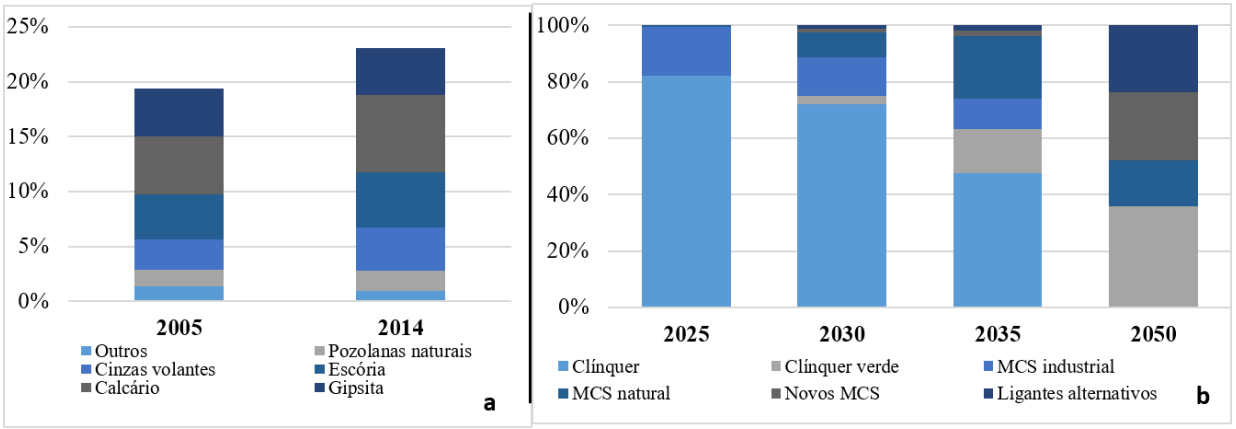


Figura 4: Uso de MCS na última década (a) e projeção do uso de ligantes (b).
Fonte: Adaptado de Apel *et al.*, 2024; GCCA, 2021; Scrivener; John; Gartner, 2018.

A proporção de MCS no clínquer envolve suas características físicas, químicas e reológicas adequadas, compatibilidade com consistência, hidratação, resistência e durabilidade da massa cimentícia (Nassiri *et al.*, 2025; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023), além do volume de fornecimento razoável (Adediran *et al.*, 2025; Antoni *et al.*, 2012; Johansson; Rootzen; Carmona, 2026; Nassiri *et al.*, 2025). Parte da literatura defende que a substituição do clínquer por MCS não ultrapasse 30%, em razão das alterações nas propriedades primárias do cimento (Antoni *et al.*, 2012), enquanto outros autores sustentam a viabilidade de substituição integral do clínquer por MCS (Shah

et al., 2022). Na Tabela 2 são listadas características intrínsecas de MCS compiladas da literatura, bem como estratégias para corrigir ou minimizar as propriedades indesejáveis.

Tabela 2: Características dos MCS e estratégias para correção ou mitigação

Característica	**Estratégias**		**Referências**
	Ação	Onde	
Escassez da quantidade em função do volume necessário	Desenvolvimento de materiais alternativos disponíveis	Fabricação do cimento	(Chen; Yang, 2023; Scrivener; John; Gartner, 2018; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023)
Alto teor de elementos expansivos, como CaO, MgO, Al	Maturação por hidratação	Aplicação do concreto ou argamassa	(Snellings, 2016)
Reatividade diferente da desejada	Uso de aditivos para suprir as características desejáveis; aumento da finura das cinzas; redução da relação água-cimento	Fabricação do concreto ou argamassa	(Giergiczny, 2019; Guynn; Kline, 2015; Han *et al.*, 2017; Snellings, 2016; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023)
Alto teor de sílica	Normatização e controle da qualidade satisfatório	Fabricação do cimento	(Giergiczny, 2019)
Menor resistência inicial	Aplicação em obras específicas; redução das partículas de clínquer, para acelerar as reações	Fabricação do cimento Aplicação do concreto ou argamassa	(Elmrabet; Harfi; Youbi, 2019; Giergiczny, 2019; Juenger; Siddique, 2015; Jueshi; Caijun; Zhi, 2001; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023)
Resistência ao gelo e à carbonatação alteradas	Uso de aditivos que possam suprir as características desejáveis	Fabricação do concreto ou argamassa	(Giergiczny, 2019; Saillio *et al.*, 2019, 2021)
Presença de materiais corrosivos ou que prejudiquem a durabilidade, como sulfato e álcalis solúveis	Remoção dos indesejáveis e pré-tratamento químico nos materiais	Preparo dos MCS	(Snellings, 2016; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023)
Finura muito alta ou insuficiente	Padronização da finura	Preparo dos MCS	(Jueshi; Caijun; Zhi, 2001; Snellings, 2016)
Cor muito intensa e indesejada	Uso de químicos para remoção seletiva de cores	Preparo dos MCS	(Snellings, 2016)
Diversidade nas características de cinzas disponíveis	Uso de aditivos que possam suprir as características desejáveis	Preparo do MCS, fabricação do cimento ou fabricação do concreto ou argamassa	(Giergiczny, 2019; Nassiri *et al.*, 2025; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023)
Alteração na trabalhabilidade natural do concreto	Carbonatação mineral; uso de aditivos ou combinação com outros MCS, para suprir as características desejáveis	Fabricação do concreto ou argamassa	(Cheung; Roberts; Liu, 2018; Johansson; Rootzen; Carmona, 2026; Juenger; Siddique, 2015; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023; Sun *et al.*, 2023)
Atividade pozolânica	Empacotamento de partículas para melhorar a atividade pozolânica; ajustar a temperatura de calcinação, para obter as características desejáveis (fases amorfas altamente reativas)	Fabricação do cimento	(Baggio; Possan; Andrade, 2024; Nassiri *et al.*, 2025)
Embora haja grande volume de palhas e folhas (biomassa), a quantidade que é processada via queima controlada é limitada	Desenvolver a cadeia, para coleta e queima em temperatura adequada	Preparo dos MCS	(Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023)
A química básica do cimento pode ser alterada, com deficiência de elementos importantes	Uso de aditivos e/ ou combinação de aditivos que possam suprir as características desejáveis	Preparo do MCS, fabricação do cimento ou fabricação do concreto ou argamassa	(Antoni *et al.*, 2012; Chong *et al.*, 2024)
Pode favorecer a carbonatação	Ampliar estudos acerca da durabilidade e efeitos nas edificações	Aplicação do concreto e argamassas	(Antoni *et al.*, 2012)
Necessidade de redução das partículas à nano	Moagem com o menor consumo energético possível; uso de aditivos que melhorem as características dispersantes	Preparo do MCS ou fabricação do concreto ou argamassa	(Juenger; Siddique, 2015; Nassiri *et al.*, 2025)

Quimicamente, é esperado que a redução do teor clínquer não comprometa o desempenho do cimento, o que torna indispensável compreender a composição e as reações químicas dos MCS utilizados (Snellings; Scrivener, 2016). Nesse sentido é crescente o desenvolvimento tecnológico para uso de materiais como sílica ativa, argilas, e resíduos da construção civil em

substituição parcial do clinquer (Baggio; Possan; Andrade, 2024; Costa; Ribeiro, 2020; Ige; Olanrewaju, 2023; Ludwig; Zhang, 2015; SNIC; ABCP, 2019; Supino *et al.*, 2016; UNEP-SBCI, 2017). A diversidade de MCS é importante para que a escassez de um material específico não limite a substituição parcial de clínquer (Scrivener; John; Gartner, 2018; Williams; Yang, 2024). Os aditivos químicos, como redutores de água, podem suprir características indesejáveis dos MCS, o que já é uma prática consolidada no setor (Aïtcin, 2000; Cheung; Roberts; Liu, 2018; Hu *et al.*, 2024; Mounir; Abdelghani, 2025; Natalli *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2026).

A aplicação de cimentos para usos específicos e a adição de aditivos químicos são procedimentos simples para as centrais dosadoras, mas representam um desafio para o representativo mercado de cimento ensacado. Quando o cimento comercializado não está pronto para uso, há risco de que os aditivos não sejam incorporados ou sejam aplicados de forma incorreta (Cheung; Roberts; Liu, 2018). Especialistas do setor reconhecem a necessidade de programas de capacitação para os consumidores, a conexão entre os órgãos reguladores nacionais e internacionais do segmento e de avaliações técnicas dos impactos econômicos e ambientais da substituição do clínquer (SNIC; ABCP, 2019).

Os novos ligantes, como clínquer de belita, cimentos à base de sulfualuminato de cálcio, silicatos de cálcio ou magnésio e de geopolímeros são alternativas promissoras para a neutralidade de carbono (Chen, Hao *et al.*, 2025; Griffiths *et al.*, 2023; Williams; Yang, 2024). A disponibilidade da matéria-prima, a durabilidade, o desempenho e o potencial de descarbonização são os principais fatores avaliados para viabilidade técnica e a escalabilidade comercial (Nehdi; Marani; Zhang, 2024). Como exemplo, foi relatada a redução de até 45,5% no consumo energético e 35,1% nas emissões de CO_2 diretamente no processo de fabricação de ligantes alternativos em comparação com o CPC (Cimento Portland comum) (Williams; Yang, 2024).

A projeção para redução do teor de clínquer no cimento tem impulsionado o desenvolvimento tecnológico para consolidar novos MCS e novos ligantes. Requisitos normativos deverão ser atualizados para abarcar os novos produtos e assegurar padrões de durabilidade e desempenho compatíveis com a aplicação (Chen, Hao *et al.*, 2025; Griffiths *et al.*, 2023).

3.1.4. Aumento da reatividade do clínquer

Aumentar a reatividade do clínquer é uma estratégia complementar ao uso de MCS para a redução das emissões de CO_2, que pode ser implementada a partir de alterações físico-químicas do material. A moagem é um processo que altera as características físicas do material, pela redução das partículas, aumento da superfície de contato com a água e consequente aceleração das reações

químicas do cimento e aumento da demanda de água na hidratação (Mehta; Monteiro, 2006; Zheng *et al.*, 2026). Partículas mais grossas frequentemente apresentam núcleos de cimento não hidratado (anidro), que permanecem sem reagir por muitos anos após a aplicação, o que é considerado um desperdício de material reativo (Dyer, 2014).

Entretanto, como as reações de hidratação são exotérmicas, este é um dos fatores limitantes para uso de cimentos de granulometria muito fina (Mehta; Monteiro, 2006). Neste quesito, o uso de MCS traz benefícios pela diluição na concentração de clínquer, o que mitiga a taxa de liberação de calor. Como fator positivo, a aceleração das reações químicas do cimento reflete no desenvolvimento de resistência nas idades iniciais, ocasionada pela maior formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (Aïtcin, 2000; Enders; Müller; Matschei, 2024), porém, aumenta o risco de fissuração por retração plástica (Dyer, 2014). A maturação do concreto ocorre naturalmente e restam dúvidas quanto à ocorrência desse processo nos concretos produzidos com cimentos mais finos. Uma vez que 38% da energia total consumida na fabricação do cimento (Toprak *et al.*, 2020) é no processo de moagem, o ganho voltado à redução das emissões de CO_2 está no equilíbrio entre o melhor aproveitamento das partículas reduzidas do clínquer e o custo para obter a finura desejada.

Já as alterações químicas do clinquer são provenientes principalmente das temperaturas de clinquerização e do coprocessamento nos fornos. A transformação da fase belita (C_2S) em alita (C_3S) ocorre de forma expressiva em temperaturas a partir de 1350º, com rendimento ótimo entre 1400 e 1450ºC (Dyer, 2014). O aumento da reatividade do clínquer, caracterizado pelo aumento do teor de C_3S, favorece a substituição de maior parcela de clínquer por MCS, sem prejuízos ao desempenho mecânico do cimento e com redução das emissões atmosféricas associadas ao processo produtivo (Scrivener; John; Gartner, 2018). Entretanto, a característica intrínseca de alguns materiais utilizados no coprocessamento pode alterar as temperaturas em que a formação de C_3S ocorre, como na presença de álcalis – característicos nas biomassas (Beguedou *et al.*, 2023). Por outro lado, mesmo na temperatura ótima a formação de C_3S pode ser comprometida, quando os materiais utilizados no coprocessamento são ricos em óxidos de zinco e chumbo (Castañón *et al.*, 2021). Além disso, nos picos de temperatura, as fases intersticiais se tornam sensíveis, especialmente a fase de aluminato tricálcico (C_3A) (Dyer, 2014). As variações na temperatura ou na fonte de energia utilizada para alimentar os fornos modificam os teores de C_2S, C_3S e C_3A do clínquer, cujas proporções relativas definem o perfil de reatividade, calor de hidratação e desenvolvimento de resistências mecânicas do cimento (Natalli *et al.*, 2021). As fases mineralógicas não são diretamente especificadas pelas normas reguladoras, que se pautam na composição química global e desempenho mecânico, o que revela uma lacuna de conhecimento acerca dos efeitos das alterações das fases C_2S, C_3S e C_3A associadas ao desempenho estrutural do concreto produzido com cimentos de menor fator clínquer.

Para além dos aspectos técnicos, embora o setor reconheça a importância do uso de MCS e aumento da reatividade para alcançar a neutralidade de carbono, há um interesse econômico por parte das indústrias nessas estratégias, pois a redução do clínquer no cimento diminui o custo de produção ao mesmo tempo que cimentos menos emissivos podem ser comercializados a preços mais elevados (Apel *et al.*, 2024; Natalli *et al.*, 2021). É uma dimensão relevante e raramente debatida no setor.

3.1.5. Captura, estocagem e utilização de carbono de carbono (CCUS)

As tecnologias de CCUS consistem em capturar o CO_2 emitido em processos produtivos, normalmente por meio da seletividade química aplicada aos gases de combustão (Barbhuiya *et al.*, 2024). Entre as tecnologias disponíveis para a captura de carbono industrial estão a gaseificação pré-combustão, para produção de gás de síntese ou hidrogênio; a captura direta; separação por membranas; criogenia, combustão de oxicombustível, além de outras ainda em desenvolvimento (Amran *et al.*, 2022; Chang *et al.*, 2024; EPE, 2024; GCCA, 2021). A escolha do método é associada ao tamanho da planta e à taxa de recuperação de CO2 (Wang *et al.*, 2026). A captura de CO_2 é uma rota aplicável também a outras indústrias que buscam a descarbonização, como as siderúrgicas, química pesada e petrolíferas (Amran *et al.*, 2022; EPE, 2024; IEA, 2020) e será indispensável para o cumprimento da meta de neutralidade de carbono em 2050 (Consoli; Havercroft; Irlam, 2017; Reis *et al.*, 2023).

Dentre as rotas possíveis, a captura direta do ar (DAC) opera por meio de adsorventes que fazem a capturam seletivamente o CO_2 atmosférico, com ocupação média de 0,2 km^2 por tonelada de CO_2 capturado, baixo consumo energético e alto potencial para emissões negativas de carbono (Bouaboula *et al.*, 2024; Keith *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2024). De forma alternativa, o CO_2 pode ser capturado diretamente nas chaminés, conforme ilustrado para o processo de um cimenteira, na Figura 5.

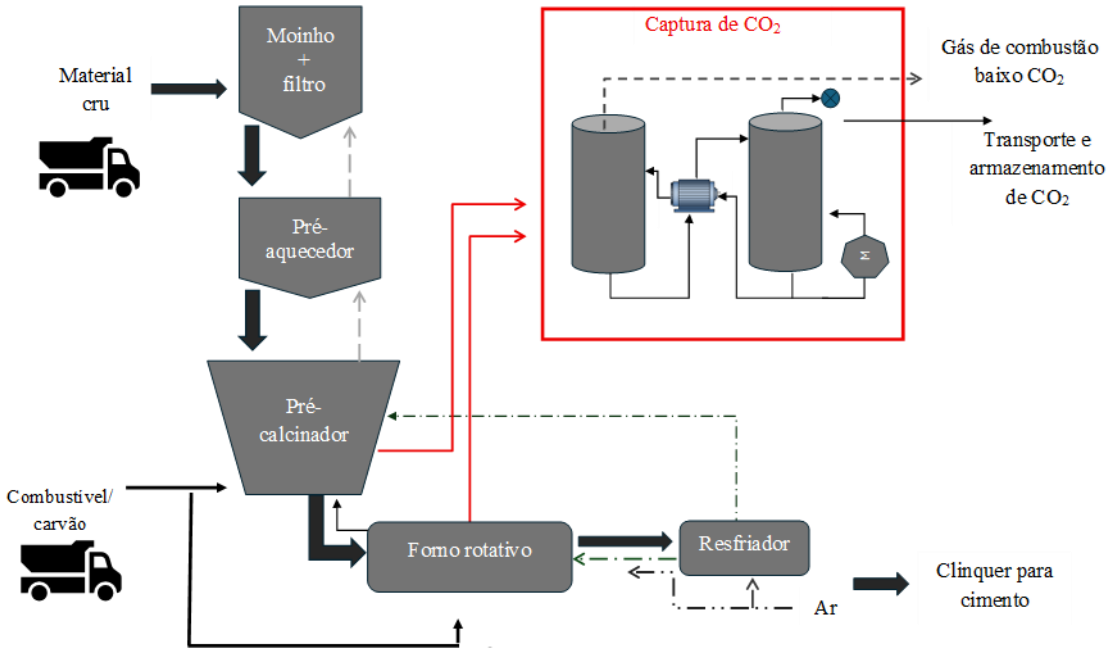


Figura 5: Esquema do processo industrial do clínquer com captura de carbono.
Fonte: Adaptado de Antzaras et al., 2023; Hanifa et al., 2023; IEA, 2020.

O CO_2 capturado precisa ser transportado, normalmente via dutos, rodovias, navios ou ferrovias (EPE, 2024; Fan *et al.*, 2025), dentre os quais via dutos é a forma de menor custo (Chang *et al.*, 2024). O custo do transporte é fator determinante na viabilidade econômica do uso do CO_2, o que torna imperativo utilizar o carbono no local mais próximo possível da captura (Abdelshafy; Walther, 2022; Fan *et al.*, 2025; Ganzer; Mac Dowell, 2023; He *et al.*, 2026; Monteiro; Roussanaly, 2022). Para o armazenamento, os reservatórios esgotados de gás e petróleo possuem características geológicas adequadas (Barbhuiya *et al.*, 2024; Monteiro; Roussanaly, 2022; Wang *et al.*, 2026). Outras opções incluem aquíferos salinos e jazidas de carvão não minerável (EPE, 2024). O armazenamento nas jazidas de carvão que não serão exploradas apresenta o benefício de melhorar a recuperação do metano ali presente (Barbhuiya *et al.*, 2024). Ao injetar o CO_2 comprimido e, consequentemente, em fase líquida, o ideal é que o reservatório esteja a uma profundidade de pelo menos 800 metros, como forma de reter o líquido (IEA, 2020).

A capacidade global de armazenamento de CO_2 não é precisamente quantificada (IEA, 2020), mas estima-se que seja suficiente para milhares de anos (EPE, 2024), o que reforça a necessidade de políticas regulatórias e protocolos de monitoramento que garantam a eficácia e a segurança dessa atividade (Barbhuiya *et al.*, 2024). Um dos relevantes aspectos para o desenvolvimento e difusão das tecnologias de CCUS é a utilização do CO_2 capturado. Neste contexto, soluções que empregam CO_2 para produção de combustíveis alternativos, a "*rota power-to-x (PtX)*" são consideradas promissoras (IEA; WBCSD; CSI, 2018), assim como as voltadas à produção de

energéticos como metano, metanol e o hidrogênio (He *et al.*, 2026; Zuberi; Shehabi; Rao, 2024). Outras aplicações são encontradas na produção de minerais, de produtos químicos, polímeros e na indústria cimenteira (Monteiro; Roussanaly, 2022; Rigo *et al.*, 2025). As aplicações atuais de CO_2 têm escala insuficiente para o consumo do que deve ser capturado, o que caracteriza uma lacuna a ser superada pelo desenvolvimento tecnológico.

Dentre as aplicações de CO_2 na indústria da construção civil, o processo de carbonatação é uma delas e consiste em uma reação química do CO_2 com os compostos hidratados de matrizes à base de CP (Danieli *et al.*, 2025; Mehta; Monteiro, 2006; Noshin *et al.*, 2026; Risson *et al.*, 2026; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023). É uma reação lenta (Equação 1) que ocorre naturalmente pela exposição dos materiais cimentícios à atmosfera, com captura e fixação permanente de CO_2. A reação tem início na aplicação dos materiais na construção e se intensifica após a demolição dos elementos e estruturas, face ao aumento da área superficial exposta (Pade, Guimarães, 2007, Possan et al., 2016). Esse processo pode ser acelerado em aplicações intencionais de CO_2, com destaque para processos de aplicação de CO_2 como aditivo na mistura do concreto (Hanifa *et al.*, 2023), como agente de cura (Fortunato; Parsekian; Junior, 2022; Srivastava; Clark, 2026) e no tratamento de agregados reciclados (Srivastava; Clark, 2026) e pós reciclados (Risson *et al.*, 2026).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{(Equação 1)}$$

Na carbonatação acelerada ou intencional de materiais à base de cimento, o CO_2 é empregado com a finalidade de acelerar as reações de hidratação e ampliar o sequestro de carbono (Hanifa *et al.*, 2023; Noshin *et al.*, 2026; Possan; Felix; Thomaz, 2016; Suescum-Morales *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2024), além de melhorar o desempenho mecânico da matriz ou na redução do consumo de cimento (Hanifa *et al.*, 2023). Já no tratamento de agregados de concreto reciclado via mineralização, o CO_2 reage com os hidróxidos de cálcio, hidratos de sílica de cálcio, silicato dicálcico, silicato tricálcico e clínquer não hidratado, que preenchem poros do concreto, com consequente redução da porosidade (Barbhuiya *et al.*, 2024; Danieli *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2022; Proença *et al.*, 2024; Uratani; Griffiths, 2023).

Se para estruturas em concreto armado a carbonatação pode ser indesejável, porque ao reduzir o pH do concreto pode desencadear o processo de corrosão das armaduras (Mehta; Monteiro, 2006; Possan; Felix; Thomaz, 2016), quando restrita à fração externa do concreto contribui para o aumento da resistência superficial (Dyer, 2014; Guleria; Sharma; Goyal, 2024) e para a fixação de carbono (Galan *et al.*, 2010; Pade; Guimaraes, 2007; Possan; Felix; Thomaz, 2016; Rigo *et al.*, 2025). Porém, diante de inúmeros fatores de influência e da inexistência de protocolos para

determinar a fixação do CO_2 decorrente da reação natural de carbonatação, há divergências na literatura quanto à quantidade de CO_2 que pode efetivamente ser capturada por esse processo. A GCCA (GCCA, 2025a) indica que, estequiometricamente, cada tonelada de clínquer pode recarbonatar até 0,525 toneladas de CO_2, o que pode representar 6% da meta de descarbonização do setor atribuída à carbonatação natural (IEA; WBCSD; CSI, 2018).

Entretanto, o valor real da recarbonatação dependerá da formação dos compostos hidratados na matriz, da área do material exposta ao CO_2 (relação m^2 de construção por m^3 de material cimentício utilizado), da proteção da área superficial, das condições do ambiente de exposição, entre outros (Possan; Felix; Thomaz, 2016). Além disso, ainda não há um procedimento de cálculo difundido para esta contabilização, tampouco consenso na literatura sobre a quantidade de CO_2 que pode ser fixada neste processo (Possan, 2019).

Além das tecnologias de CCUS dos materiais à base de cimento, há o exemplo de uma cimenteira indiana que adotou um processo de sequestro biológico do CO_2 por meio de florestas ou cultivos, com a fixação de carbono na fotossíntese (Amran *et al.*, 2022; Boehm *et al.*, 2023). Para tal, a empresa cultiva bambu e utiliza a biomassa como combustível nos fornos de clinquerização, em substituição ao carvão fóssil (GCCA, 2023). Esse tipo de estratégia recebe algumas críticas por demandar grandes áreas de cultivo, que competem com a produção alimentar (Chang *et al.*, 2024; Galán; Martín; Grossmann, 2023) e dificilmente alcançam escalabilidade.

A partir de 2030, é estimado que os projetos de CCUS associados ao setor cimenteiro possam capturar em média 1 milhão de toneladas de CO_2 por ano (GCCA, 2025a). Para a expansão deste potencial, as tecnologias de CCUS precisam de amadurecimento tecnológico, viabilidade técnica e econômica, regulações ambientais, infraestrutura e estabelecimento de métodos de determinação, requisitos que demandam trabalho em rede e aceitação pública, motivos pelos quais a perspectiva é que suas contribuições na descarbonização sejam relevantes na próxima década (Abdelshafy; Walther, 2022; Danieli *et al.*, 2025; Fan *et al.*, 2025; GCCA, 2023; IEA; WBCSD; CSI, 2018; SNIC; ABCP, 2019).

A legislação que regula a comercialização dos créditos de carbono precisa acompanhar o avanço das tecnologias de CCUS. Na Europa, métodos de certificação para cada tipo de remoção de carbono estão em desenvolvimento (Boehm *et al.*, 2023). No Brasil, a Lei 15.042 (Brasil, 2024) instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de emissões (SBCE), com obrigatoriedade para empresas que emitem mais de 25 mil toneladas de CO_2 equivalente por ano. A taxação crescente sobre as emissões de carbono é um instrumento de indução à descarbonização, porém, no modelo europeu, os impostos sobre o carbono emitido são maiores que os custos com CCUS (Antzaras *et al.*, 2023).

Neste mercado ainda em desenvolvimento, o ajuste dos incentivos é um instrumento relevante para a transição rumo à neutralidade de carbono (Busch *et al.*, 2022; Oguntola; Simske, 2023). O ponto de equilíbrio entre a taxação das emissões e os créditos por emissões negativas define o nível a partir do qual as emissões líquidas são nulas (Ganzer; Mac Dowell, 2023; Gao *et al.*, 2020). Com igual importância, eventuais *trade-offs* entre a redução de carbono e a durabilidade das estruturas devem ser analisados de forma sistêmica (Possan, 2026).

A implementação das tecnologias de CCUS tende a elevar os custos de produção e o preço do cimento ao consumidor. Todavia, a expectativa é que o amadurecimento dessas tecnologias e o avanço das legislações de comercialização de carbono mitiguem esse impacto, diante da crescente demanda global por cimento projetada até 2050 (Antzaras *et al.*, 2023; Danieli *et al.*, 2025). A análise do ciclo de vida de cada tecnologia ou material incorporado à cadeia produtiva é essencial para a avaliação precisa dos impactos ambientais e da viabilidade das tecnologias propostas (Chang *et al.*, 2024). As dimensões técnica, econômica e regulatória que permeiam a implementação das tecnologias de CCUS para descarbonização requerem abordagem multissetorial e de integração entre os atores das cadeias do CP.

3.2. PRODUTOS E SERVIÇOS À BASE DE CIMENTO: CONCRETO E ARGAMASSA

A otimização na produção e no uso do concreto e das argamassas responde por 11% da meta de neutralidade de carbono atribuída ao setor cimenteiro (GCCA, 2021). Essa cadeia produtiva inclui as centrais dosadoras e misturadoras, as indústrias de estruturas e elementos pré-fabricados, além do segmento de aplicação do cimento ensacado. Um mapeamento referente ao mercado europeu indica que as emissões atmosféricas associadas à cadeia do CP, provenientes das etapas de fabricação, construção e demolição de edifícios também estão na ordem de 11% (Broer; Simjanovic; Toth, 2022), emissões essas compostas majoritariamente pelo consumo energético na fabricação, na demolição e descarte dos materiais (Watari *et al.*, 2023).

Apesar de o concreto ser um material de uso universal, o mercado de cada região tem características específicas, o que torna ineficaz uma solução global única nesta cadeia, voltada à neutralidade de carbono (Nehdi; Marani; Zhang, 2024). Ainda assim, é possível identificar pontos de congruência que favoreçam o desenvolvimento de alternativas aplicáveis em contextos distintos, conforme abordado a seguir.

3.2.1. Otimização de processos e do consumo de cimento

A projeção crescente de consumo de cimento para os próximos anos está associada aos países em desenvolvimento, que demandam infraestrutura, porém, o acesso às tecnologias de construção e a disponibilidade de pessoal qualificado são limitados (Uratani; Griffiths, 2023). Por questões culturais e econômicas, 42% do cimento consumido nesses países é ensacado e misturado manualmente no canteiro de obras para produção de argamassas de assentamento ou revestimento e concretos de baixa resistência (Marsh *et al.*, 2024; Scrivener; John; Gartner, 2018; Skinner; Radhika, 2023; SNIC; ABCP, 2019), prática associada ao desperdício e consumo excessivo de cimento por m³.

O manuseio incorreto de materiais, em muitos casos decorrente da baixa qualificação da mão de obra, gera resíduos desnecessários (Akhtar; Sarmah, 2018). Um estudo conduzido no Brasil mostra que a dosagem inadequada de cimento na produção de argamassas, e seu uso para corrigir imperfeições da execução chega a incrementar em até 40% o volume projetado. Aumentar a eficiência na execução das obras pode contribuir com a redução de até 25% no consumo do cimento, com impacto direto nas emissões associadas à sua produção (SNIC; ABCP, 2019).

Em locais onde o cimento ensacado não pode ser facilmente substituído, pré-misturas ensacadas para concretos e argamassas são uma alternativa viável. Produzidas em centrais com controle tecnológico, requerem apenas da adição de água no momento do uso, com indicação clara da quantidade máxima a empregar (GCCA, 2023; Reis *et al.*, 2020; Skinner; Radhika, 2023; SNIC; ABCP, 2019; Uratani; Griffiths, 2023; Walling; Provis, 2016). Apesar de simples, essas medidas podem reduzir em até 30% o consumo de cimento no concreto (Skinner; Radhika, 2023). O preparo adequado e o melhor aproveitamento dos produtos cimentícios demandam conhecimento sobre proporcionamento dos materiais, com base em teorias de otimização do esqueleto granular, nas quais o preenchimento dos vazios intergranulares com partículas de distintas granulometrias reduz o consumo da pasta de cimento com manutenção ou ganho da resistência mecânica (Campos; Klein; Marques Filho, 2020; Oliveira *et al.*, 2023).

O uso de aditivos químicos que promovam a dispersão das partículas e as reações químicas esperadas na pasta de cimento é uma estratégia complementar para melhorar a aplicabilidade do concreto ou argamassa (Knight; Cunningham; Miller, 2023). Essas abordagens podem resultar em menor consumo de cimento por volume de concreto ou argamassa, sem prejuízos às especificações de projeto. Exemplo dessa abordagem foi relatada, em que a otimização do empacotamento de partículas associada ao uso de aditivos químicos permitiu reduzir o uso de cimento no concreto e as emissões atmosféricas associadas (Hafez *et al.*, 2024). Em conjunto com outras estratégias técnicas, essa abordagem possibilitou o aumento do número de pavimentos de um edifício

habitacional sem acréscimo nas emissões de carbono, resultado alinhado ao conceito de desempenho estrutural por unidade de carbono emitido (GCCA, 2025a). Apesar dos benefícios técnicos obtidos com uso dos aditivos químicos, as avaliações econômicas e ambientais sobre sua contribuição para a neutralidade de carbono ainda são escassas (Nehdi; Marani; Zhang, 2024) e requerem atenção.

Nos países em desenvolvimento, as estratégias para otimizar o consumo de cimento que têm maiores chances de implementação são as de baixo custo, poucos recursos tecnológicos e aplicação por mão de obra pouco especializada (Scrivener; John; Gartner, 2018; UNEP-SBCI, 2017). A comercialização de pré-misturas ensacadas pode evitar a dosagem desnecessária de cimento. Tais ações, associadas ao uso de aditivos químicos, tendem a contribuir com a redução das emissões atmosféricas e do desperdício nos canteiros de obras.

3.2.2. Agregados menos emissivos

Os principais agregados utilizados na produção de concretos e argamassas são areia, pedra britada e cascalho natural (Mehta; Monteiro, 2006). As emissões atmosféricas dos agregados são, em média, 2% do total atribuído à indústria do cimento (Watari *et al.*, 2023), mas carece de observação pelo seu impacto em duas vertentes: a extrativista e do transporte (Torres *et al.*, 2021). A pegada de carbono desde a extração até o consumidor varia entre 3,7 e 38,2kg de CO_2 equivalente por tonelada de agregado (Bortoli, 2023), em função da região, tipo de rocha e da matriz energética empregada no processamento. Quanto ao transporte, é certo que quanto maior a distância, maiores serão as emissões atmosféricas (Paz *et al.*, 2023).

Geralmente a maior parcela dos agregados utilizados na produção do concreto é de origem virgem e não renovável, o que pode causar desequilíbrio advindo da extração, agravado pelo aumento crescente no consumo de concreto (Driessen; Gronlund, 2024; Watari *et al.*, 2023). A exploração excessiva dos recursos finitos pode levar à escassez regional no curto prazo (Miller *et al.*, 2025), situação amplificada pelas extrações ilícitas, que geram impactos ambientais adicionais (Torres *et al.*, 2021). O reaproveitamento dos resíduos de construção (RCD) pode minimizar os impactos da extração de agregados naturais em até 9% (Chen *et al.*, 2022; Cordoba; Paulo; Irassar, 2023; Kim, 2022; Miller *et al.*, 2025), além de contribuir com a destinação correta dos RCDs e consequente redução das emissões atmosféricas, pela captura de carbono (Rigo *et al.*, 2025). Para produção de uma tonelada de agregado natural e reciclado, são emitidas 3,07 e 1,85 quilogramas de CO_2, respectivamente (Bampanis; Vasilatos, 2023).

Os agregados também podem ser substituídos por resíduos de granito, de mármore, de rochas ornamentais, pó de pedra e de vidro, resíduos de escória e similares (Abdelmawgoud *et al.*,

2024; Bahar *et al.*, 2025; Hentges *et al.*, 2026; Queiróz; Frascá, 2008). Contudo, sua escala de geração é insuficiente para atender à demanda de consumo dos agregados naturais.

Além disso, como principais limitadores para a ampla utilização dos agregados reciclados estão o baixo preço dos agregados virgens no mercado; os custos de processamento e transporte dos agregados reciclados; o baixo custo de descarte em aterros sanitários, conforme preconiza a legislação, e alterações das propriedades mecânicas do concreto (Rigo *et al.*, 2025; Silva; de Brito; Dhir, 2017). A quantidade de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados sugerida na literatura está entre 20% e 60% (Junior *et al.*, 2025), com valor ótimo em 30% (Nanya; Ferreira; Capuzzo, 2021). O controle da qualidade do material é fundamental na produção do concreto com agregado reciclado (Junior *et al.*, 2025; Kim, 2022; Nanya; Ferreira; Capuzzo, 2021; Paris *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021).

Embora os agregados reciclados sejam pesquisados há 70 anos (Wang *et al.*, 2021), no Brasil essa prática ainda não é rotina no setor, em razão da baixa participação nas emissões totais, da disponibilidade de agregados naturais, de fatores econômicos e regulatórios. Porém, é uma alternativa válida para a destinação adequada dos resíduos de construção civil que, sem eliminar o uso dos recursos naturais, visa sua utilização mais racional.

3.3. APLICAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS, PRODUTOS E PROCESSOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme sistematizado na Figur, a progressão da indústria do cimento à cadeia da construção civil amplia o grau de complexidade e o número de agentes envolvidos, com resultados esperados no médio e longo prazo. A construção civil é o setor de aplicação dos materiais cimentícios e produtos de outras cadeias industriais, como aço e plásticos, que por apresentarem elevada pegada de carbono e energia são considerados setores estratégicos para o cumprimento das metas do Acordo de Paris (ETC, 2018), com especial atenção ao CP, responsável por 7% das emissões antropogênicas de CO_2 (IPCC, 2005). A demanda crescente por infraestrutura na África Subsaariana, Ásia e Pacífico, Índia e Oriente Médio indica tendência de elevação no consumo de CP nas próximas décadas, uma vez que sua substituição por materiais menos emissivos com custo e desempenho similar ainda é um desafio do setor (Chen, Hao *et al.*, 2025; Scrivener; John; Gartner, 2018; Snellings, 2016; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023).

À construção civil é atribuída a meta de 22% da descarbonização do setor (GCCA, 2021). As estratégias para alcançar essa meta compreendem a eficiência na concepção, nos projetos

e na escolha de materiais menos emissivos para as construções, maximização do uso e aumento da durabilidade das construções (ETC, 2018; GCCA, 2021). Essas abordagens são detalhadas na sequência e, somadas, têm potencial de evitar a emissão de 2,1Gt de CO_2 até 2050 (Papamichael *et al.*, 2023), montante expressivo na trajetória de neutralidade de carbono.

3.3.1. Concepção, projeto e redução de perdas

A literatura classifica em duas categorias as emissões atmosféricas associadas às construções: o carbono operacional, relativo ao consumo energético durante o uso e o carbono incorporado, proveniente da produção, transporte, construção e destinação dos materiais ao fim do ciclo de vida (WBCSD, 2021). O carbono operacional pode ser mitigado ao longo do tempo, todavia, o carbono incorporado, que não pode ser recuperado, representa até 50% das emissões de um edifício ao longo do ciclo de vida (Ghorbany; Hu; Nouri, 2025; Myint *et al.*, 2025; WBCSD, 2021). Projetos que visem a neutralidade de carbono devem considerar ambas as fontes, pois nas etapas de concepção e projeto são tomadas as decisões quanto ao impacto ambiental da construção ao longo do seu ciclo de vida.

Os ambientes construídos são responsáveis por 38% das emissões globais de CO_2 provenientes do consumo de energia (UNEP, 2024b). Soluções consolidadas como o aproveitamento da iluminação natural, a aplicação de isolantes térmicos, o uso de sistemas de automação, medidores e redes inteligentes contribuem com a redução das emissões provenientes do carbono operacional (Cabeza *et al.*, 2023). Essas estratégias, ainda que tecnicamente bem estabelecidas, dependem de regulação, incentivos econômicos e alterações na cultura dos projetos para obter escalabilidade (UNEP, 2024).

O carbono incorporado pode ser mitigado, nas etapas de concepção e projeto, com auxílio de ferramentas como BIM, gêmeos digitais, inteligência artificial e IoT, que permitem ao projetista executar simulações energéticas que integram desempenho estrutural e carbono incorporado com variação dos materiais (Rojini; Hou; Feng, 2026; Silva *et al.*, 2026). A utilização desses recursos é relevante, pois 70% do carbono incorporado na fabricação de um edifício procede de apenas seis materiais empregados: concreto e cimento; aço; alumínio; vidro; plástico e isolantes; madeira e gesso (WBCSD, 2021; Zinecker; Bourgault; Lehmann, 2021). Neste contexto, ter acesso à rastreabilidade e pegada de carbono do material, ou declarações ambientais dos produtos, é tão relevante quanto conhecer seus requisitos técnicos (Broer; Simjanovic; Toth, 2022).

No mercado europeu, mais desenvolvido nos requisitos regulatórios ambientais, as declarações ambientais dos produtos estão sistematizadas em plataformas como *Environdec,*

Madaster Germany, One Click Life Cycle Assessment – LCA, RE2020 e *Digital Product Passport – DPP*. No Brasil foi desenvolvida a plataforma SIDAC - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção, que calcula indicadores ambientais para o mercado nacional, quanto aos seguintes requisitos: demanda de energia primária, emissão de CO_2 e estoque temporário de carbono biogênico (Belizario-Silva *et al.*, 2023). A padronização global dessas declarações é necessária por questões de importação e exportação dos materiais (Palumbo *et al.*, 2020; Rocha; Caldeira-Pires, 2019; Senseney *et al.*, 2023), além de facilitar a tomada de decisão via comparação entre diferentes materiais cuja metodologia de estimativa de impacto ambiental possui base comum de determinação.

A análise de ciclo de vida (ACV) é fundamental nesse processo, e será mais eficaz se integrada já no início do projeto e contemplando o ciclo de vida completo, e não apenas do berço ao portão (Kayaçetin; Hozatlı, 2024; Senseney *et al.*, 2023). A seleção dos materiais deve ser realizada com critérios abrangentes, como demonstrado em estudo que comparou as emissões de carbono em uma moradia urbana construída com concreto de baixo carbono frente a materiais de base biológica e terra estabilizada. A constatação foi que os materiais alternativos disponíveis são suficientes para atender apenas 13,7% da demanda mapeada de habitações, além de contribuir com o aumento de até 4,1Gt de CO_2 equivalente das emissões atmosféricas (Hafez *et al.*, 2026b). A seleção de materiais de construção deve priorizar o CO_2 incorporado ao longo do ciclo de vida, com prioridade aos materiais com menor intensidade de carbono, maior eficiência enérgica no uso de recursos e maior potencial de reutilização e reciclagem. Além disso, os insumos tradicionais devem ser gradativamente substituídos por alternativas de baixo carbono (do aço à materiais biológicos) com promoção de cadeias produtivas mais circulares, baseadas em desempenho ambiental (UNEP, 2023).

No projeto estrutural, a seleção do sistema construtivo impacta diretamente o volume de materiais empregados, como a substituição de uma laje plana sobre vigas por laje nervurada, que pode reduzir de 20% até 50% a pegada de carbono (Hafez *et al.*, 2024; Mata Falcón *et al.*, 2022). Em outros casos, especificações adequadas podem alcançar a mesma resistência estrutural com redução de até 55% do cimento consumido (Papamichael *et al.*, 2023). O uso de elementos pré-fabricados ou mais tecnológicos, como a impressão do concreto em três dimensões (Miller *et al.*, 2025; Teng; Pan, 2019; Watari *et al.*, 2023), são soluções que reduzem as perdas diretas observadas nas construções. Além disso, edificações projetadas para facilitar as manutenções e ajustar o uso têm sua vida útil prolongada (Myint *et al.*, 2025), o que leva ao máximo aproveitamento dos materiais empregados.

No quesito regulatório, a legislação europeia avalia a construção com olhar sistêmico da concepção à utilização, com metas para o carbono incorporado e requisitos de eficiência energética durante o uso (Miller *et al.*, 2025; Watari *et al.*, 2022). A ONU estabeleceu diretrizes para

a descarbonização do setor construtivo, com estímulo a projetos integrados que contemplem materiais de baixo carbono, eficiência energética, uso de renováveis e adaptação a extremos climáticos (UNEP, 2024b), numa abordagem que incorpora as mudanças climáticas já em curso como premissa de projeto. A ampla utilização dessas abordagens requer conhecimento em ACV, dados regionalizados, políticas públicas, normatização e incentivos econômicos (Myint *et al.*, 2025; Watari *et al.*, 2023). A descarbonização associada à concepção e projeto deve ser integrada, desde a seleção dos materiais até o fim da vida útil da edificação.

3.3.2. Aumento da durabilidade e redução das manutenções

Outro aspecto de destaque na avaliação das emissões atmosféricas é a durabilidade das construções (Adesina; Zhang, 2024), uma vez que aumentar o tempo de utilização da edificação e reduzir as manutenções das construções são instrumentos para reduzir a geração de resíduos e a demanda de novas construções (Hooton; Bickley, 2014; Miller *et al.*, 2025; Papamichael *et al.*, 2023). A sustentabilidade de uma estrutura de concreto engloba a descarbonização, o ciclo de vida, a vida útil e a durabilidade do material (Possan, 2026; Possan; Dal Molin; Andrade, 2018). Dados indicam que uma edificação projetada para 50 anos emite três vezes mais CO_2 do que uma construção similar projetada para 80 anos (Ghorbany; Hu, 2025). Por isso, os autores defendem que os aspectos de sustentabilidade ambiental de uma construção sejam pautados em ACV e não apenas nos requisitos normativos do concreto, de modo que uma construção com menor pegada de carbono será aquela edificada com materiais menos emissivos e com maior durabilidade, mas que garanta desempenho ao longo do tempo (Adesina; Zhang, 2024; Ghorbany; Hu, 2025), desde que não fique obsolescente.

Em 2020 foi lançado na Europa o *Renovation Wave*, um programa para descarbonizar o setor da construção, que visa até 2030 duplicar a renovação dos ambientes construídos e reduzir as emissões atmosféricas do setor em 55% (Di Ruocco, 2024). Para alcançar a meta, além de focar em ações já existentes, como certificados de desempenho energético e planos de renovação de longo prazo, foram adicionados padrões mínimos obrigatórios de desempenho energético, requisitos de sustentabilidade dos materiais de construção e diretrizes para redução dos resíduos de demolição (Broer; Simjanovic; Toth, 2022). Todavia, para a renovação energética, a meta estabelecida era de 3% ao ano, com resultados reais de 0,2% em 2025, em grande parte atribuídos à falta de integração e cooperação entre as partes interessadas (Lassandro *et al.*, 2025).

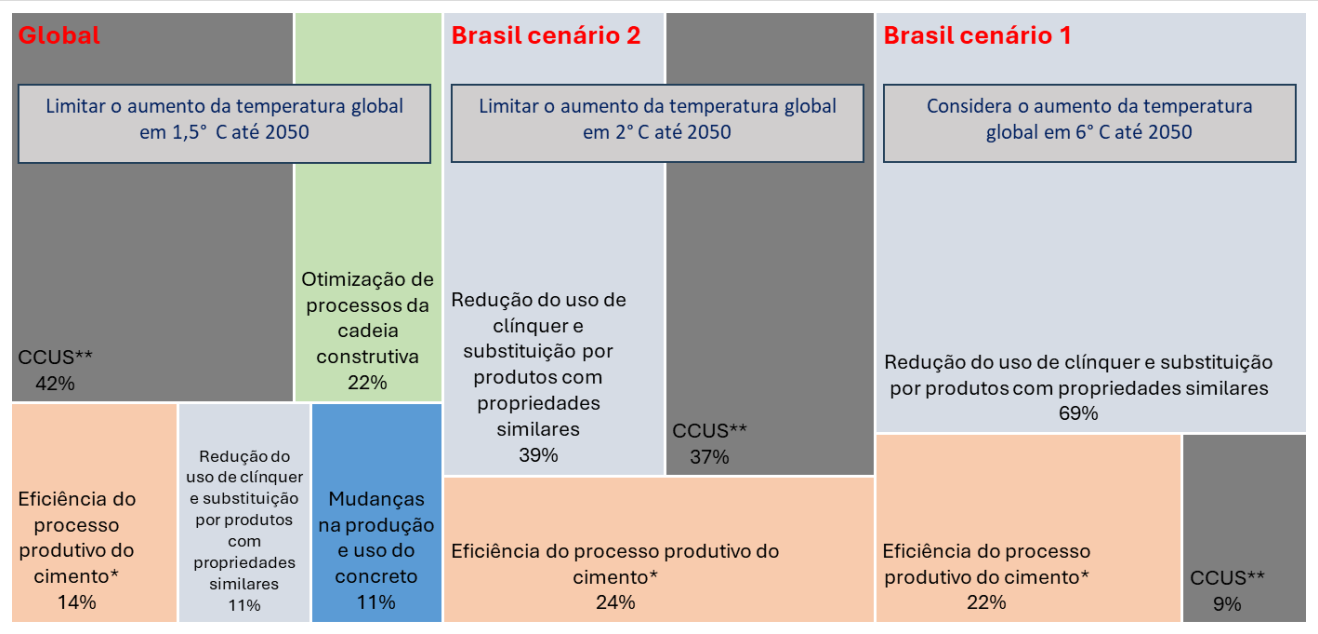
Por outro lado, projetos bem elaborados, executados com materiais menos emissivos, de boa qualidade e por mão de obra qualificada, tendem a alcançar a vida útil de projeto com intervenções pontuais, o que representa menor carbono incorporado nas manutenções ao longo

do ciclo de vida (Miller *et al.*, 2025; Papamichael *et al.*, 2023). Quando as manutenções não forem suficientes para prolongar a vida útil e a demolição for a melhor saída, estratégias de reciclagem dos resíduos podem reduzir a pegada de carbono das construções em 151 a 247kg de CO_2 equivalente por m^2 demolido, quando comparadas às emissões por destinação em aterros (Myint *et al.*, 2025).

De modo geral, as estratégias para descarbonização da construção civil variam conforme as condições econômicas, materiais disponíveis e políticas públicas locais (Adesina; Zhang, 2024; Cabeza *et al.*, 2023). Os países desenvolvidos priorizam a modernização dos edifícios para ganhar eficiência energética, enquanto os países em desenvolvimento estão voltados aos projetos otimizados, durabilidade das construções e preços acessíveis, com garantia de desempenho ao longo do ciclo de vida (Hooton; Bickley, 2014).

4. CIMENTO PORTLAND ZERO CARBONO: POTENCIAL E LIMITAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

As metas do setor cimenteiro rumo à neutralidade de carbono estão consolidadas em *roadmap* setoriais (Figura 6). O *roadmap* internacional indica que as principais rotas para neutralizar o carbono dessa cadeia são: i) eficiência do processo produtivo do cimento; ii) redução do uso de clínquer e substituição por produtos com propriedades similares; iii) mudanças na produção e uso do concreto; iv) otimização de processos da cadeia construtiva e v) CCUS (GCCA, 2021). No Brasil, existem dois cenários definidos em função das projeções de aumento da temperatura global, com foco em apenas três estratégias: i) eficiência do processo produtivo do cimento; ii) redução do uso de clínquer e substituição por produtos com propriedades similares e iii) CCUS (SNIC; ABCP, 2019). Os aspectos de otimização dos processos e de mudanças na produção e uso do concreto não foram contemplados nas metas declaradas ao mercado brasileiro.



*Eficiência do processo produtivo do cimento inclui uso de combustíveis alternativos e a eficiência energética na indústria;
**Captura, estocagem e utilização do carbono inclui a recarbonatação natural.
Figura 6: Rotas estabelecidas para a neutralidade de carbono na cadeia do cimento e materiais cimentícios.
Fonte: Adaptado de GCCA, 2021; SNIC; ABCP, 2019.

No *roadmap* internacional, um terço da meta total de descarbonização foi atribuído ao usuário do cimento: 22% por meio da otimização dos processos da cadeia produtiva e 11% por meio das mudanças na produção e uso do concreto. Na prática, o cimento comercializado não é intrinsicamente neutro em carbono e depende de medidas externas para essa condição, sob o risco de que as estratégias sejam pouco efetivas, sobretudo nos países em desenvolvimento, exatamente onde se projeta aumento no consumo de cimento nos próximos anos (Chen, Hao *et al.*, 2025) e há limitações estruturais, lacunas regulatórias e informalidade no setor da construção.

Quando comparados os cenários global e brasileiro (Figura 6), as globais propostas são pulverizadas, com a maior contribuição (42%) em CCUS, tecnologia ainda não consolidada e de alto custo (Danieli *et al.*, 2025; Reis *et al.*, 2023). No Brasil o foco majoritário, especialmente no Cenário 1, está na redução do uso do clínquer, com a responsabilidade concentrada na indústria do cimento, a estratégia de menor custo e complexidade de implementação (Scrivener; John; Gartner, 2018). Isso se justifica pelo perfil de consumo do cimento, onde 62% são adquiridos por pequenos consumidores (SNIC, 2024), padrão este recorrente nos países em desenvolvimento (UNEP-SBCI, 2017). Em um mercado disperso e informal, o gerenciamento de metas de descarbonização é um desafio.

A indústria brasileira de cimento, composta por 94 plantas (SNIC, 2024), é reconhecida globalmente por baixas emissões atmosféricas: para cada tonelada de clínquer produzido a emissão média é de 0,7 toneladas de CO_2, frente a 0,85 toneladas nos Estados Unidos e uma média

mundial de 0,8 toneladas (Cembureau, 2024a; IEA, 2023; Shah *et al.*, 2022; SNIC; ABCP, 2019). O teor de clínquer no cimento brasileiro era de 65% em 2020, enquanto a meta global para esse percentual está prevista apenas para 2030 (Figura), com uma projeção de 57% em 2050 (IEA, 2023; SNIC; ABCP, 2019). Esses dados corroboram a meta estabelecida para a indústria brasileira de reduzir o teor de clínquer no cimento para 52% até 2050 (SNIC; ABCP, 2019).

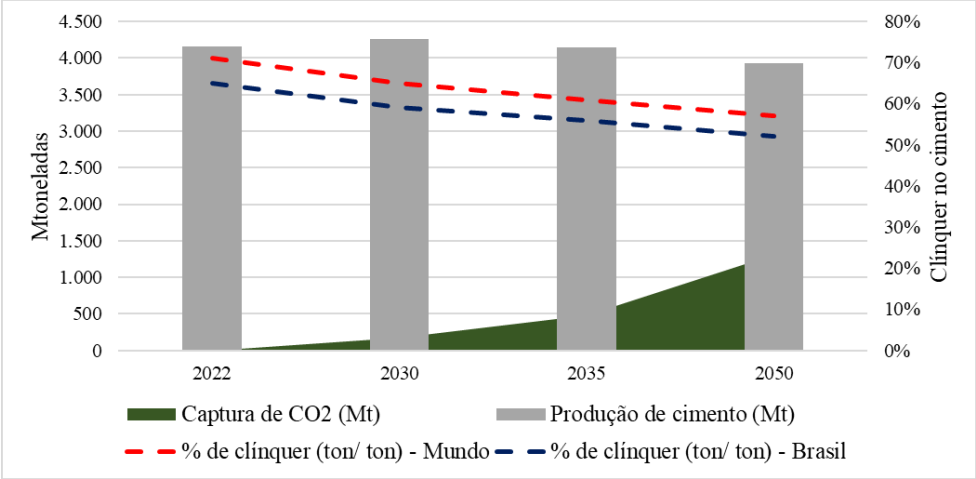


Figura 7: Projeção para descarbonizar a indústria do Cimento Portland.
Fonte: Adaptado de IEA, 2023; SNIC; ABCP, 2019.

Ainda que em 2020 a indústria cimenteira emitiu 44% menos CO_2 que em 1990, o crescente consumo de cimento, que quadruplicou no mesmo período, resultou em um aumento de três vezes nas emissões atmosféricas (Watari *et al.*, 2023). Assim, a aplicação de CCUS se apresenta como a alternativa para compensar o crescimento das emissões absolutas e justifica a crescente meta apresentada na Figura, que prevê capturar 1.310 milhões de toneladas de CO_2 em 2050 (IEA, 2023). O relatório de monitoramento das metas de descarbonização aponta para os desafios que precisam ser superados, principalmente no desenvolvimento de tecnologias escaláveis para CCUS (GCCA, 2025a), uma vez que essa estratégia apresenta o maior déficit de implementação (30 pontos percentuais), muito associado à necessidade de maturidade tecnológica ainda não alcançada. As categorias foram agrupadas em: i) metas diretamente ligadas à indústria cimenteira; ii) metas relativas ao concreto, argamassas e construções e iii) CCUS, conforme informações apresentadas na Figura.

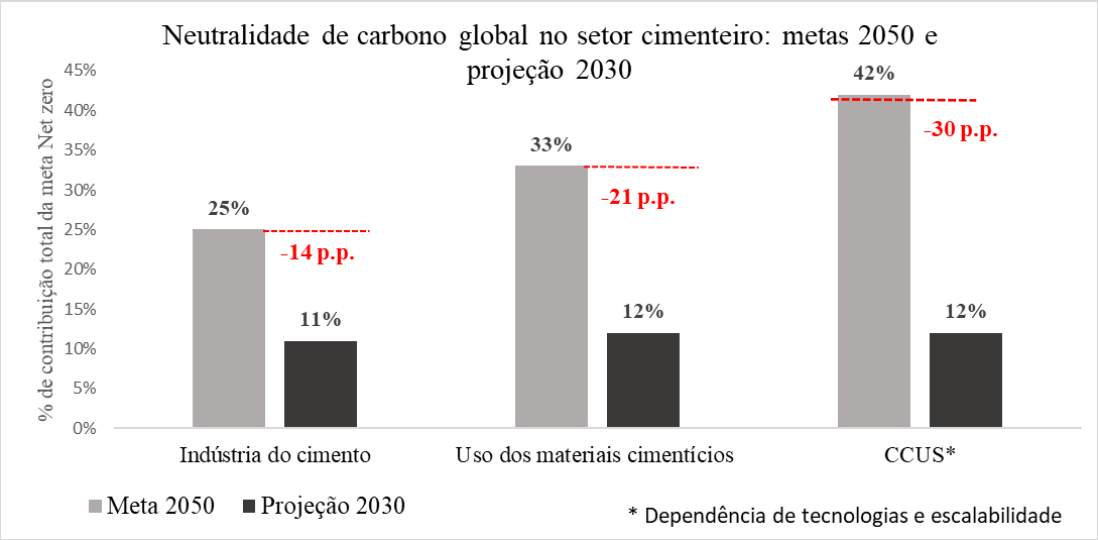


Figura 8: Metas estabelecidas para 2050 e projeção de execução em 2030, para a neutralidade de carbono global cimenteiro.
Fonte: Adaptado de GCCA, 2025.

Nas cadeias do concreto e da construção, mesmo as ações mais simples que podem contribuir com a mitigação das emissões ainda têm um déficit de implementação, que pode ser associado à falta de integração das cadeias e/ou ao preço do cimento ainda não ter impactado consideravelmente os custos das construções. Assim, a neutralidade de carbono do setor da construção civil em 2050 é marcada por ações coordenadas entre a iniciativa pública, privada e academia, para investimentos e desenvolvimento tecnológico (ETC, 2019; Griffiths *et al.*, 2023; Sousa; Bogas, 2021). A próxima década será decisiva na implementação de tecnologias, sobretudo de CCUS, para que as emissões de CO_2 equivalente do processo produtivo sejam reduzidas do atual intervalo de 375 a 925 kg, para 40 a 125 kg por tonelada de cimento produzido (IEA, 2022).

5. TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS

As tendências globais dominantes na busca pela neutralidade de carbono são: a redução do teor de clínquer, a otimização dos processos industriais e o avanço das tecnologias de CCUS (GCCA, 2021; IEA; WBCSD; CSI, 2018; SNIC; ABCP, 2019). Na indústria do cimento, a substituição do clínquer por MCS se consolida como a estratégia de maior impacto e menor custo relativo, embora ainda demande padronização no desempenho esperado e garantia de durabilidade a longo prazo, temas ainda pouco explorados para MCS emergentes. A eficiência energética, coprocessamento e recuperação de calor residual complementam os esforços diretos de mitigação das emissões de carbono.

Na cadeia dos produtos e serviços, a de menor contribuição para a meta global de

descarbonização, otimizar os processos e consumo do cimento e utilizar agregados menos emissivos são ações propostas. Na etapa de uso dos materiais cimentícios, mudanças na concepção, projetos, redução das perdas e aumento da durabilidade das construções são as oportunidades identificadas e relatadas na literatura, embora ainda pouco aproveitadas (Watari *et al.*, 2022).

Os maiores investimentos em ciência e tecnologia serão voltados a CCUS, para a gestão do carbono que não pode ser evitado a fim de alcançar a neutralidade das emissões. O desenvolvimento regulatório e de políticas públicas de incentivo são necessários para garantir a rastreabilidade das emissões capturadas(Oguntola; Boakye; Simske, 2024), o que reforça a necessidade da combinação das estratégias de média a alta escalabilidade, com maior viabilidade sistêmica do que soluções de alto impacto de forma isolada.

É fato que nenhuma estratégia isolada associada ao CP será capaz de promover a descarbonização da cadeia da construção de forma eficaz e com custo competitivo. A produção de cimentos com carbono neutro pode ser a opção mais viável para o cumprimento da meta até 2050, face à menor complexidade de descarbonização na cadeia do cimento, que para tal demanda a implementação de tecnologias de CCUS, com implicações diretas nas cadeias do concreto e da construção. O cimento descarbonizado tende a aumentar o custo do produto (Antzaras *et al.*, 2023), o que torna a otimização dos processos, a redução dos desperdícios, o aumento da industrialização e as mudanças na etapa de concepção estratégias solidárias e necessárias para a descarbonização das cadeias do concreto e da construção civil. Novos ligantes menos emissivos, com menor dependência do clínquer e desempenho equivalente são centrais para minimizar o aumento do preço do cimento (Antzaras *et al.*, 2023; Danieli *et al.*, 2025).

Neste contexto, as cadeias do produto (concreto e argamassa) e a aplicação final (as construções) deixam de ser responsáveis por um terço da meta total de descarbonização do cimento (IEA; WBCSD; CSI, 2018) e passam a ter papéis ativos na mitigação das emissões decorrentes de seus próprios processos, o que inclui a adoção das tecnologias de CCUS – das quais a maturidade tecnológica determinará o ritmo da transição para carbono neutro. A conexão entre as cadeias do cimento, concreto e construções é feita pela colaboração entre o setor público, por meio de regulação e incentivos; o setor privado, que investe e implementa ações efetivas de descarbonização; e a academia, dedicada ao desenvolvimento de soluções. Na Figura 9 um resumo das abordagens aqui discutidas quanto às metas para alcançar a neutralidade de carbono, os custos de abatimento e o nível de implementação.

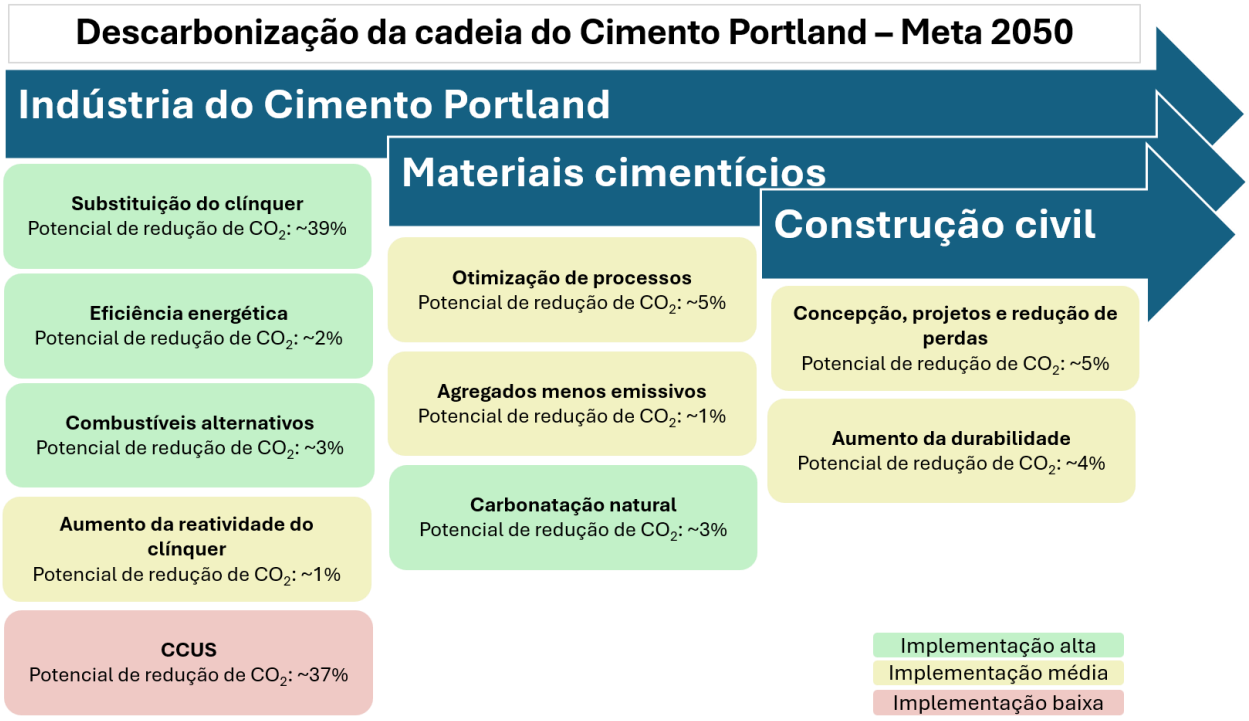


Figura 9: Resumo das estratégias e grau de implementação para descarbonização da cadeia do Cimento Portland.
Fonte: Adaptado de GCCA, 2021; IEA, 2023; SNIC, ABCP, 2019.

A descarbonização da indústria do CP requer o engajamento da cadeia completa, ao longo do ciclo de vida do cimento. Ações isoladas terão baixa efetividade, o que demonstra a necessidade de um elo entre as cadeias, com a academia no papel de traduzir demandas práticas em soluções técnicas que sejam simultaneamente relevantes para a descarbonização da cadeia do CP, escalonáveis e economicamente viáveis (Oguntola; Simske, 2023).

Os fatores políticos e de interesse de grupos extrapolam a abordagem técnica realizada, entretanto, são condicionantes estruturais, pois a ausência de incentivo público e engajamento das grandes indústrias limita o avanço das medidas de mitigação, por mais robustas que sejam. Ademais, fatores específicos de cada país, como aspectos econômicos, culturais, regulatórios, demográficos e padrões de consumo devem ser considerados para garantir a aplicação da estratégia apresentada, com a premissa de manter o CP com preço acessível à população em geral, incluindo a de menor renda (Scrivener; John; Gartner, 2018), como forma de garantir acesso às moradias e infraestrutura no sul global.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou criticamente as principais abordagens para a descarbonização da cadeia da construção a partir do fluxo do CP. É evidente que a neutralidade de carbono na cadeia do CP depende do trabalho conjunto entre os setores público, no campo da regulação, privado, na implementação das ações de descarbonização e academia, no desenvolvimento de tecnologias necessárias. Para mitigar as emissões atmosféricas:

- O uso das tecnologias de CCUS é indispensável, porém, é dependente de maturidade tecnológica, regulação, redução de custos e metodologias que avaliem a real descarbonização a partir dessa estratégia. Está em estágio inicial de implantação;
- A redução do teor de clínquer no cimento tem potencial para contribuir com, no mínimo, 37% da meta brasileira de descarbonização, número este que pode chegar a 69%. O uso de MCS é a principal estratégia para este fim. Em ambientes sujeitos à ação do CO2, essa substituição deve ser conduzida com critérios, face aos riscos de afetar a durabilidade das construções. A disponibilidade de MCS adequados em quantidade suficiente para a demanda é um desafio. Muitas pesquisas para prospecção de MCS são fragmentadas e não contemplam ACV e custos pertinentes;
- Um terço da meta global de neutralidade de carbono do CP está atrelado às cadeias do concreto e da construção, nas quais aumentam a complexidade de implementação e de mensuração dos resultados. A decisão por projetos e materiais menos emissivos é atrelada aos projetistas, construtores e ao consumidor do cimento. A efetividade das ações nesses elos da cadeia exige o rompimento de paradigmas, a industrialização de processos e a qualificação de mão de obra;
- No cenário brasileiro as estratégias de descarbonização com custos de abatimento negativos estão, em sua maioria, em processo avançado de implantação. A matriz energética brasileira, a disponibilidade e diversidade de MCS facilitaram a implementação das ações mais vantajosas economicamente.

O Brasil reúne condições para favoráveis para as rotas de abatimento de custo negativo no curto prazo, já em estado avançado de implementação, especialmente, o uso de MCS. O desafio remanescente está nas frentes não completamente consolidadas e que são prioritárias em pesquisas futuras: desenvolvimento e validação de tecnologias de CCUS em escala comercial; a

avaliação do impacto da redução do teor de clínquer e dos MCS emergentes sobre a durabilidade das construções e a mensuração efetiva da redução das emissões evitadas ao longo do ciclo de vida. O avanço nessas frentes define o caminho para a neutralidade de carbono do CP.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por meio do EDITAL 08/2024 - PPGIES/ILATIT, bolsas para o programa de pós-graduação interdisciplinar em Energia & Sustentabilidade. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – edital nº 8/2024 PPGIES/ILATIT.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Juliana Gaio Somer: Conceitualização, Metodologia, Resultados e Discussão, Redação - Preparação do rascunho original. Edna Possan: Conceitualização, Supervisão, Metodologia, Discussão, Redação - Preparação do rascunho original. Redação - Revisão e Edição.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSES

As autoras declaram não ter conhecimento de quaisquer interesses financeiros ou relacionamentos pessoais conflitantes que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Durante a preparação deste trabalho, a primeira autora utilizou a ferramenta Claude (Anthropic – versão Opus 4.8) em julho de 2026 para a melhoria da clareza textual. Após o uso da ferramenta, as autoras revisaram e editaram o conteúdo, e assumem total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

REFERÊNCIAS [CAPÍTULO III]

ABCP. Uma tecnologia sustentável - Panorama do Coprocessamento. São Paulo: 2024.

ABDELMAWGOUD, M. et al. Recommendation for concrete mixture design and guidelines for ECP using marble and RCA. Innovative Infrastructure Solutions 2024 9:8, vol. 9, no 8, p. 302-, 2024.

ABDELSHAFY, A.; WALTHER, G. Coupling carbon capture and utilization with the construction industry: Opportunities in Western Germany. Journal of CO_2 Utilization, vol. 57, 2022.

ADEDIRAN, A. et al. Conventional and potential alternative non-conventional raw materials available in Nordic countries for low-carbon concrete: A review. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 104, 2025.

ADESINA, A.; ZHANG, J. Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency. Next Sustainability, vol. 3, p. 100025, 2024.

AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research, vol. 30, no 9, p. 1349–1359, 2000.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production, vol. 186, p. 262–281, 2018.

ALAUX, N. et al. Preserving buildings: emission reductions from circular economy strategies in Austria. Buildings and Cities, vol. 6, no 1, p. 881–898, 2025.

AMRAN, M. et al. Global carbon recoverability experiences from the cement industry. CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 17, 2022.

ANTONI, M. et al. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and Concrete Research, vol. 42, no 12, p. 1579–1589, 2012.

ANTZARAS, A. N. et al. Techno–economic and environmental assessment of CO_2 capture technologies in the cement industry. Journal of Cleaner Production, vol. 428, 2023.

APEL, F. et al. The future cement industry: A cementitious ‘golden age’? Chicago: McKinsey & Company, 2024. Disponível em: https://www.mckinsey.com.br. Acesso em: 18 ago. 2025.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, vol. 11, no 4, p. 959–975, 2017.

ATMACA, A.; YUMRUTAŞ, R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry. Applied Thermal Engineering, vol. 66, no 1–2, p. 435–444, 2014.

BAGGIO, T. F.; POSSAN, E.; ANDRADE, J. J. de O. Physical-chemical characterization of construction and demolition waste powder with thermomechanical activation for use as supplementary

cementitious material. Construction and Building Materials, vol. 437, 2024.

BAHAR, A. et al. Effect of recycled waste glass color on the properties of high-volume glass powder cement pastes. RESULTS IN ENGINEERING, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 28, 2025.

BAMPANIS, I.; VASILATOS, C. Recycling Concrete to Aggregates. Implications on CO_2 Footprint. Material Proceedings, p. 28, 2023.

BARBHUIYA, S. et al. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. Journal of Building Engineering, vol. 86, 2024.

BEGUEDOU, E. et al. Alternative Fuels Substitution in Cement Industries for Improved Energy Efficiency and Sustainability. Energies, vol. 16, no 8, 2023.

BELIZARIO-SILVA, F. et al. The Sidac system: Streamlining the assessment of the embodied energy and CO_2 of Brazilian construction products. Journal of Cleaner Production, vol. 421, 2023.

BOEHM, S. et al. State of Climate Action 2023. World Resources Institute, 2023.

BORTOLI, A. de. Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. Journal of Cleaner Production, vol. 415, p. 137629, 2023.

BOUABOULA, H. et al. Comparative review of Direct air capture technologies: From technical, commercial, economic, and environmental aspects. Chemical Engineering Journal, vol. 484, 2024.

BRASIL. LEI No 15.042 - Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Brasília: Diário Oficial da União, 2024. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199. Acesso em: 14 ago. 2025.

BROER, R.; SIMJANOVIC, J.; TOTH, Z. Implementing the Paris agreement and reducing greenhouse gas emissions throughout the life cycle of buildings: European public policies, tools and market initiatives. 2022.

BUSCH, P. et al. Literature review on policies to mitigate GHG emissions for cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling, vol. 182, 2022.

CABEZA, L. F. et al. Buildings. Cambridge University Press, 2023.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. Journal of Cleaner Production, vol. 265, 2020.

CARPIO, R. C. et al. Alternative Fuels Mixture in Cement Industry Kilns Employing Particle Swarm Optimization Algorithm. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, no 4, p. 335, 2008.

CASTAÑÓN, A. M. et al. Used tires as fuel in clinker production: Economic and environmental

implications. Sustainability (Switzerland), vol. 13, no 18, 2021.

CEMBUREAU. Activity Report. Brussels: 2024. Disponível em: www.cembureau.eu.

CHANG, Y. et al. Techno-economic analysis of carbon capture and utilization technologies and implications for China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 199, 2024.

CHEN, H. et al. 200 years of Portland cement: Technological advancements and sustainability challenges. Journal of Cleaner Production, vol. 486, 2025.

CHEN, X. et al. Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties, durability and microstructure assessment. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 52, 2022.

CHEN, H.; YANG, J. A new supplementary cementitious material: Walnut shell ash. Construction and Building Materials, vol. 408, 2023.

CHEUNG, J.; ROBERTS, L.; LIU, J. Admixtures and sustainability. Cement and Concrete Research, vol. 114, p. 79–89, 2018.

CHONG, B. W. et al. Assessment of waste eggshell powder as a limestone alternative in portland cement. MATERIALS AND STRUCTURES, VAN GODEWIJCKSTRAAT 30, 3311 GZ DORDRECHT, NETHERLANDS, vol. 57, no 10, 2024.

CIOBANU, C. et al. Assessment of Environmental Pollution in Cement Plant Areas in Romania by Co-Processing Waste in Clinker Kilns. Energies, vol. 15, no 7, 2022.

CONSOLI, C. P.; HAVERCROFT, I.; IRLAM, L. Carbon Capture and Storage Readiness Index: Comparative Review of Global Progress towards Wide-scale Deployment. Energy Procedia, vol. 114, p. 7348–7355, 2017.

CORDOBA, G.; PAULO, C. I.; IRASSAR, E. F. Towards an eco-efficient ready mix-concrete industry: Advances and opportunities. A study of the Metropolitan Region of Buenos Aires. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 63, no A, 2023.

COSTA, F. N.; RIBEIRO, D. V. Reduction in CO_2 emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). Journal of Cleaner Production, vol. 276, 2020.

DANIELI, S. et al. Shaping a sustainable path: Exploring opportunities and challenges in carbon capture and utilization in cement and concrete industry. CEMENT, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 19, 2025.

DI RUOCCO, G. Renovation Wave in Europe: Low-Carbon Design for the Refurbishment of Social Housing in Southern Italy. Buildings, vol. 14, no 6, 2024.

DRIESSEN, E.; GRONLUND, E. Circular concrete scenarios and their environmental impacts: A life cycle assessment modelled after a Swedish city. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION,

125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 485, 2024.

DYER, T. Concrete Durability. 1. ed. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2014.

ELMRABET, R.; HARFI, A. El; YOUBI, M. S. El. Study of properties of fly ash cements. Materials today: proceedings, vol. 13, p. 850–856, 2019.

ENDERS, M.; MÜLLER, R.; MATSCHEI, T. Impact of particle size, clinker mineralogy and sulfate availability on early cement hydration: Observations from isothermal heat-flow calorimetry. Cement and Concrete Research, vol. 185, p. 107613, 2024.

EPE. Captura, armazenamento e utilização de carbono no Brasil. Rio de Janeiro: 2024.

ETC. Mission possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid - century. 2018.

ETC. Mission possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century. Sectoral focus: cement. 2019. Disponível em: Acesso em: 10 abr. 2026.

FAN, J. L. et al. Early Opportunities for Onshore and Offshore CCUS Deployment in the Chinese Cement Industry. Engineering, vol. 46, p. 348–362, 2025.

FANKHAUSER, S. et al. The meaning of net zero and how to get it right. Nature Climate Change, no January 22, p. 15–21, 2022.

FATAHI, R. et al. Modeling operational cement rotary kiln variables with explainable artificial intelligence methods–a “conscious lab” development. Particulate Science and Technology, vol. 41, no 5, p. 715–724, 2023.

FORTUNATO, L. R.; PARSEKIAN, G. A.; JUNIOR, A. N. CO_2 capture of concrete units for pavement through accelerated carbonation cure. International Journal of Masonry Research and Innovation, vol. 7, no 3, p. 233, 2022.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Global Carbon Budget 2020. Earth System Science Data, vol. 12, no 4, p. 3269–3340, 2020.

GALAN, I. et al. Sequestration of CO_2 by Concrete Carbonation. Environmental Science and Technology, vol. 44, no 8, p. 3181–3186, 2010.

GALÁN, G.; MARTÍN, M.; GROSSMANN, I. E. Systematic comparison of natural and engineering methods of capturing CO_2 from the air and its utilization. Sustainable Production and Consumption, vol. 37, p. 78–95, 2023.

GANZER, C.; MAC DOWELL, N. Pathways to net zero for power and industry in the UK. International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 125, 2023.

GAO, W. et al. Industrial carbon dioxide capture and utilization: State of the art and future challenges. Chemical Society Reviews, vol. 49, no 23, p. 8584–8686, 2020.

GCCA. Cement & Concrete Industry Net Zero Action & Progress Report 2025/26. London: 2025.

GCCA. Concrete Future: Cement Industry Net Zero Progress Report. London: 2023.

GCCA. Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London: 2021.

GEORGIOPOULOU, M.; LYBERATOS, G. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. Journal of Environmental Management, vol. 216, p. 224–234, 2018.

GHORBANY, S.; HU, M. A systematic framework to reduce urban embodied carbon emissions using urban scale simulation. npj Urban Sustainability, vol. 5, no 1, 2025.

GHORBANY, S.; HU, M.; NOURI, A. Commercial buildings decarbonization: Benchmarks and strategies for the United States sustainable commercial construction. Sustainable Cities and Society, vol. 124, 2025.

GIERGICZNY, Z. Fly ash and slag. Cement and Concrete Research, vol. 124, 2019.

GRIFFITHS, S. et al. Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 180, 2023.

GULERIA, H.; SHARMA, D.; GOYAL, S. Long term performance of concrete using accelerated carbonation curing: an effective CCUS technique. European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 28, no 9, p. 2138–2159, 2024.

GUO, X. et al. Carbon reduction in cement industry - An indigenized questionnaire on environmental impacts and key parameters of life cycle assessment (LCA) in China. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 426, 2023.

GUYNN, J.; KLINE, J. Maximizing SCM Content of Blended Cements. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no 6, p. 4824–4832, 2015.

HAFEZ, H. et al. Low-carbon concrete has the potential to meet global urban housing needs by 2050. Communications Sustainability, vol. 1, no 1, p. 28, 2026.

HAFEZ, H. et al. Parametric study on the decarbonization potential of structural system and concrete mix design choices for mid-rise concrete buildings. Materials and Structures/ Materiaux et Constructions, vol. 57, no 4, 2024.

HAN, F. et al. Effect of water-to-binder ratio on the hydration kinetics of composite binder containing slag or fly ash. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 128, no 2, p. 855–865, 2017.

HANIFA, M. et al. A review on CO_2 capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies. Journal of CO_2 Utilization, vol. 67, 2023.

HE, Y. et al. Scaling green hydrogen and CCUS via cement–methanol co-production in China. Energy & Environmental Science, vol. 19, no 6, p. 2028–2044, 2026.

HENTGES, T. I. et al. Use of high limestone filler content to improve natural aggregate liberation

and concrete waste recyclability. Materials Today Communications, vol. 52, p. 115118, 2026.

HOOTON, R. D.; BICKLEY, J. A. Design for durability: The key to improving concrete sustainability. Construction and Building Materials, vol. 67, no PART C, p. 422–430, 2014.

HU, Z. et al. The Role of Chemical Activation in Strengthening Iron Ore Tailings Supplementary Cementitious Materials. BUILDINGS, ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, vol. 14, no 4, 2024.

IEA. Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members. 2022.

IEA. Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture, Utilization and Storage. 2020.

IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. Paris: 2023.

IEA; WBCSD; CSI. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement IndustryInternational Energy Agency. 2018.

IGE, O. E.; OLANREWAJU, O. A. Comparative Life Cycle Assessment of Different Portland Cement Types in South Africa. Clean Technologies, vol. 5, no 3, p. 901–920, 2023.

IGE, O. E.; VON KALLON, D. V.; DESAI, D. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. Clean Technologies and Environmental Policy, vol. 26, no 3, p. 579–597, 2024.

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas IPCC. 2018.

IPCC. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2005.

ISHAK, S. A.; HASHIM, H. Low carbon measures for cement plant a review. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 125 London Wall, London, ENGLAND, vol. 103, p. 260–274, 2015.

JOHANSSON, N. C.; ROOTZEN, J.; CARMONA, S. E. Concrete change: Exploring future scenarios for the supply of supplementary cementitious materials in the EU. DEVELOPMENTS IN THE BUILT ENVIRONMENT, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 25, 2026.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. Cement and Concrete Research, vol. 78, p. 71–80, 2015.

JUESHI, Q.; CAIJUN, S.; ZHI, W. Activation of blended cements containing fly ash. Cement and Concrete Research, vol. 31, p. 1121–1127, 2001.

JUNIOR, G. A. F. et al. A Review of the Characteristics of Recycled Aggregates and the Mechanical Properties of Concrete Produced by Replacing Natural Coarse Aggregates with Recycled Ones—Fostering Resilient and Sustainable Infrastructures. Infrastructures, vol. 10, no 8, 2025.

KANIAPPAN CHINNATHAI, M.; ALKAN, B. A digital life-cycle management framework for

sustainable smart manufacturing in energy intensive industries. Journal of Cleaner Production, vol. 419, 2023.

KARAGIANNIS, J.; FTIKOS, C.; NIKOLOPOULOS, P. The use of wastes as alternative fuels in cement production. WIT Transactions on Ecology and the Environment, vol. 109, p. 105–114, 2008.

KAWAI, K.; OSAKO, M. Reduction of natural resource consumption in cement production in Japan by waste utilization. Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 14, no 2, p. 94–101, 2012.

KAYAÇETIN, N. C.; HOZATLI, B. Whole life carbon assessment of representative building typologies for nearly zero energy building definitions. Journal of Building Engineering, vol. 95, p. 110214, 2024.

KEITH, D. W. et al. A Process for Capturing CO_2 from the Atmosphere. Joule, vol. 2, no 8, p. 1573–1594, 2018.

KIM, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. Construction and Building Materials, vol. 328, 2022.

KNIGHT, K. A.; CUNNINGHAM, P. R.; MILLER, S. A. Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete. Cement and Concrete Composites, vol. 139, 2023.

KUKREJA, K. et al. Impact assessment of alternative fuels on production Cost, plant operation and Environment- case study of Indian cement industry. Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 57, p. 103300, 2023.

L. SZABÓ et al. Energy consumption and CO_2 emissions from the world cement industry. [S. l.]: 2003. Disponível em: http://www.jrc.es.

LAN, X.; TANS, P.; THONING, K. W. Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. 2026.

LASSANDRO, P. et al. A Transition Pathways Approach for Energy Renovation in EU Building Market Ecosystems. Sustainability (Switzerland), vol. 17, no 5, 2025.

LEVI, P.; PALES, A. F.; GÜL, T. Aligning investment and innovation in heavy industries to accelerate the transition to net-zero emissions. Paris: Organization: International Energy Agency, 2020.

LI, L. et al. Mineralization and utilization of CO_2 in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder. Separation and Purification Technology, vol. 298, 2022.

LUDWIG, H. M.; ZHANG, W. Research review of cement clinker chemistry. Cement and Concrete Research, vol. 78, p. 24–37, 2015.

MARSH, A. T. M. et al. Inequalities in the production and use of cement and concrete, and their

consequences for decarbonisation and sustainable development. Environmental Research: Infrastructure and Sustainability, vol. 4, no 3, 2024.

MATA FALCÓN, J. et al. Digitally fabricated ribbed concrete floor slabs: a sustainable solution for construction. RILEM Tech Lett, vol. 7, p. 68–78, 2022.

MCCARTEN, M. et al. Global Database of Cement Production Assets. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd. ed. McGraw-Hill, 2006.

MILLER, S. A. et al. Annual Review of Environment and Resources Cement and Alternatives in the Anthropocene. p. 59, 2025.

MONTEIRO, J.; ROUSSANALY, S. CCUS scenarios for the cement industry: Is CO_2 utilization feasible?. Journal of CO_2 Utilization, vol. 61, 2022.

MOUNIR, B.; ABDELGHANI, N. Analysis of Cement Properties and Physico-Chemical Characterization of Mineral Waste: Impact of Mineral Additives on Cement Performance. Revue des Composites et des Materiaux Avances, vol. 35, no 4, p. 655–661, 2025.

MYINT, N. N. et al. Net zero carbon buildings: A review on recent advances, knowledge gaps and research directions. Case Studies in Construction Materials, vol. 22, 2025.

NANYA, C. S.; FERREIRA, F. G. da S.; CAPUZZO, V. M. da S. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete. Matéria (Rio de Janeiro), vol. 26, no 4, p. e13073, 2021.

NASSIRI, S. et al. Opportunities for Supplementary Cementitious Materials from Natural Sources and Industrial Byproducts: Literature Insights and Supply Assessment. BUILDINGS, MDPI AG, Grosspeteranlage 5, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, vol. 15, no 17, 2025.

NATALLI, J. F. et al. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 14, no 6, 2021.

NEHDI, M. L.; MARANI, A.; ZHANG, L. Is net-zero feasible: Systematic review of cement and concrete decarbonization technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 191, 2024.

NOSHIN, S. et al. Synergistic carbonation pretreatment for performance enhancement and CO_2 uptake in limestone-blended cement. CLEANER WASTE SYSTEMS, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 13, 2026.

OGUNTOLA, O.; BOAKYE, K.; SIMSKE, S. Towards Leveraging Artificial Intelligence for Sustainable Cement Manufacturing: A Systematic Review of AI Applications in Electrical Energy Consumption Optimization. Sustainability (Switzerland), vol. 16, no 11, 2024.

OGUNTOLA, O.; SIMSKE, S. Continuous Assessment of the Environmental Impact and Economic Viability of Decarbonization Improvements in Cement Production. RESOURCES-BASEL, ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, vol. 12, no 8, 2023.

OLIVEIRA, D. R. B. et al. Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production. Construction and Building Materials, vol. 397, no July, p. 1–12, 2023.

ONU. World Population Prospects 2024: Summary of Results. New York: 2024.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO_2 uptake of concrete in a 100 years perspective. Cement and Concrete Research, vol. 37, no 9, p. 1348–1356, 2007.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. Scientometrics, vol. 105, no 3, p. 2109–2135, 2015.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. Revista Panamericana de Salud Pública, vol. 46, p. e112, 2022.

PALUMBO, E. et al. How to obtain accurate environmental impacts at early design stages in BIM when using environmental product declaration. A method to support decision-making. Sustainability (Switzerland), vol. 12, no 17, 2020.

PAPAMICHAEL, I. et al. Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. Waste Management and Research, vol. 41, no 12, p. 1728–1740, 2023.

PARIS, J. M. et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, vol. 121, p. 1–18, 2016.

PAZ, C. F. et al. Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 25, no 2, p. 1082–1095, 2023.

POSSAN, E. Between green and gray: decarbonization of Portland cement and durability of concrete – a critical review. Revista ALCONPAT, vol. 16, no 1, p. 42–59, 2026.

POSSAN, E. CO_2 uptake in cementitious materials. Concreto & Construções, vol. 95, p. 60–66, 2019.

POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; ANDRADE, J. J. O. A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, vol. 3, no 1, 2018.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO_2 uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, vol. 1, no 1, 2016.

PROENÇA, M. P. et al. CDW Powder Activated by Mechanical, Thermal and Tannic Acid Treatment: An Option for Circularity in Construction. Waste and Biomass Valorization, vol. 16, no 5, p. 2367–2390, 2024.

QUEIRÓZ, F. C. de; FRASCÁ, M. H. B. de O. Estudo para o aproveitamento de resíduos pétreos de marmorarias, como agregados para concreto de cimento Portland. Exacta, vol. 6, no 1, p. 83–92, 2008.

REIS, D. C. et al. Estratégias de Descarbonização das Indústrias do Cimento e do Aço e o Papel do Setor Florestal no que Tange à Construção Civil: Estratégias de Descarbonização das Indústrias do Cimento e do Aço e o Papel do Setor Florestal no que Tange à Construção Civil. São Paulo: 2023.

REIS, D. C. et al. Influence of cement strength class on environmental impact of concrete. Resources, Conservation and Recycling, vol. 163, 2020.

RIGO, E. et al. Concrete with recycled aggregates from construction: Properties, emissions and carbon capture assessment. Case Studies in Construction Materials, vol. 23, 2025.

RISSON, K. D. B. de S. et al. Accelerated carbonation of construction waste powders: A circular economy strategy for CO_2 mitigation in cementitious materials. Case Studies in Construction Materials, vol. 24, p. e06042, 2026.

ROCHA, M. S. R.; CALDEIRA-PIRES, A. Environmental product declaration promotion in Brazil: SWOT analysis and strategies. Journal of Cleaner Production, vol. 235, p. 1061–1072, 2019.

ROJINI, K.; HOU, D.; FENG, H. Optimizing structural and environmental performance in mass timber hybrid high-rise buildings through parametric design. Journal of Building Engineering, vol. 118, 2026.

SAILLIO, M. et al. Effect of supplementary cementitious materials on carbonation of cement pastes. Cement and Concrete Research, vol. 142, 2021.

SAILLIO, M. et al. Phase assemblage of cement pastes with SCM at different ages. Construction and Building Materials, vol. 224, p. 144–157, 2019.

SBAHIEH, S.; ZAHER SERDAR, M.; AL-GHAMDI, S. G. Decarbonization strategies of building materials used in the construction industry. Materials Today: Proceedings, 2023.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low- CO_2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, vol. 114, p. 2–26, 2018.

SENSENEY, C. T. et al. Recommendations for cradle-to-gate environmental product declarations (EPD) in 'Buy Clean' procurement based on CDOT's experience. Environmental Research: Infrastructure and Sustainability, vol. 3, no 3, 2023.

SHAH, I. H. et al. Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO_2 emissions by up to 1.3 gigatons. Nature Communications, vol. 13, no 1, 2022.

SILVA, S. R. da et al. Advances in Circular Valorization of Construction and Demolition Waste (CDW) Toward Low-Carbon and Resilient Construction: A Comprehensive Review. Sustainability, vol. 18, no 6, p. 2759, 2026.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. Journal of Cleaner Production, vol. 143, p. 598–614, 2017.

SINGH, S. D. et al. Advancing Sustainability Through Waste Heat Recovery: A Comprehensive Review of Recovery Technologies, Applications, and Carbon Footprint Reduction Strategies. Circular Economy and Sustainability, vol. 6, no 2, p. 171-, 2026.

SKINNER, B.; RADHIKA, L. With Concrete, Less Is More. 2023.

SNELLINGS, R. Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials. RILEM Technical Letters, vol. 1, p. 50–55, 2016.

SNELLINGS, R.; SCRIVENER, K. L. Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: past and future. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 49, no 8, p. 3265–3279, 2016.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, vol. 171, 2023.

SNIC. Relatório anual. São Paulo: 2024.

SNIC; ABCP. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: 2019.

SOUSA, V.; BOGAS, J. A. Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. Journal of Cleaner Production, vol. 306, 2021.

SRIVASTAVA, H. K.; CLARK, S. M. Low-Carbon Concrete Development Through Incorporation of Carbonated Recycled Aggregate and Carbon Dioxide During Concrete Batching and Curing. Infrastructures, vol. 11, no 1, 2026.

SUESCUM-MORALES, D. et al. Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO_2 sequestration. Journal of CO_2 Utilization, vol. 46, 2021.

SUN, L. et al. A Review on the Application of Lignocellulosic Biomass Ash in Cement-Based Composites. Materials, vol. 16, no 17, 2023.

SUPINO, S. et al. Sustainability in the EU cement industry: The Italian and German experiences. Journal of Cleaner Production, vol. 112, p. 430–442, 2016.

TENG, Y.; PAN, W. Systematic embodied carbon assessment and reduction of prefabricated high-rise public residential buildings in Hong Kong. Journal of Cleaner Production, vol. 238, 2019.

TOPRAK, N. A. et al. Effects of grinding aid dosage on circuit performance and cement fineness. Construction and Building Materials, vol. 265, p. 120707, 2020.

TORRACO, R. J. Writing Integrative Literature Reviews: Using the Past and Present to Explore the Future. Human Resource Development Review, vol. 15, no 4, p. 404–428, 2016.

TORRES, A. et al. Sustainability of the global sand system in the Anthropocene. One Earth, vol. 4, no 5, p. 639–650, 2021.

TUFF, G. et al. Getting from hard-to-abate to a low-carbon future. 2021. Disponível em:

https://www.deloitte.com/us/en/insights/research-centers/center-for-integrated-research/environmental-and-social-issues.html. Acesso em: 30 abr. 2026.

TUNÇEZ, F. D. Utilization of waste for energy generation in clinker production: Environmental perspective. Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry, vol. 21, no 2, p. 193–201, 2020.

ULIASZ-BOCHEŃCZYK, A.; DEJA, J.; MOKRZYCKI, E. The use of alternative fuels in the cement industry as part of circular economy. Archives of Environmental Protection, vol. 47, no 4, p. 109–117, 2021.

UNEP. Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. Nairobi: 2023.

UNEP. Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Nairobi: 2024. Disponível em: Acesso em: 10 abr. 2026.

UNEP-SBCI. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low- CO_2 cement-based materials industry. Paris: 2017.

URATANI, J. M.; GRIFFITHS, S. A forward looking perspective on the cement and concrete industry: Implications of growth and development in the Global South. Energy Research and Social Science, vol. 97, 2023.

VASILIU, L. et al. Capitalization of tires waste as derived fuel for sustainable cement production. Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 56, p. 103104, 2023.

VISHWAKARMA, V.; RAMACHANDRAN, D. Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review. Construction and Building Materials, vol. 162, p. 96–103, 2018.

WALLING, S. A.; PROVIS, J. L. Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future. Chemical Reviews, vol. 116, no 7, p. 4170–4204, 2016.

WANG, B. et al. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. [S. l.]: Elsevier B.V., 2021.

WANG, Yu et al. Historical trend and decarbonization pathway of China's cement industry: A literature review. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS, vol. 891, 2023.

WANG, P. T. et al. Optimized deployment of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) in China's cement industry: A scenario-based analysis. Energy for Sustainable Development, vol. 92, p. 101948, 2026.

WATARI, T. et al. Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions. Nature Communications, vol. 13, no 1, 2022.

WATARI, T. et al. Growing role of concrete in sand and climate crises. iScience, vol. 26, no 5, 2023.

WBCSD. Net-zero buildings Where do we stand? London: 2021.

WILLIAMS, F.; YANG, A. Potential of Reducing CO_2 Emissions in Cement Production through Altering Clinker Compositions. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA, vol. 63, no 40, p. 17158–17167, 2024.

WRI. Climate Watch: historical GHG emissions. 2026. Disponível em: https://www.climate-watchdata.org/ghg-emissions. Acesso em: 6 abr. 2026.

WU, T. et al. More intensive use and lifetime extension can enable net-zero emissions in China's cement cycle. Resources, Conservation and Recycling, vol. 198, p. 107144, 2023.

XU, H. et al. A comprehensive review on direct air carbon capture (DAC) technology by adsorption: From fundamentals to applications. Elsevier Ltd, 2024.

YANG, F. et al. A new method for improving the resistance of cement-based materials to carbonic acid water corrosion: Carbonation curing and further water curing. Construction and Building Materials, vol. 422, 2024.

ZHANG, X. et al. An environmental sustainability assessment of China's cement industry based on emergy. Ecological Indicators, vol. 72, p. 452–458, 2017.

ZHENG, G. et al. Performance and optimization of rapid-setting and high-early-strength cement-based grout incorporating chemical additives used in capsule expansion technology. Case Studies in Construction Materials, vol. 24, p. e05977, 2026.

ZINECKER, A.; BOURGAULT, J.; LEHMANN, F. Embodied Carbon - A Hidden Heavyweight for the Climate. Paris: 2021.

ZUBERI, M. J. S.; SHEHABI, A.; RAO, P. Cross-sectoral assessment of CO_2 capture from U.S. industrial flue gases for fuels and chemicals manufacture. International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 135, 2024.

DESENVOLVIMENTO

IV. ESTUDO B | LOW-CARBON CEMENTS AND CONSTRUCTION DURABILITY: A SYSTEMATIC REVIEW

Este capítulo é composto por um estudo voltado à identificação do estado da arte e as tendências associadas aos cimentos de baixo carbono e sua correlação com a durabilidade das construções. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, fundamentada na metodologia Methodi Ordinatio, com o objetivo de verificar em que medida as questões de durabilidade e vida útil têm sido consideradas no desenvolvimento dos cimentos de baixa emissão de CO_2.

Esta etapa da pesquisa foi redigida no formato de artigo científico e submetida à XXII Conferência Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Construções (CINPAR 2026), com aprovação e seleção para publicação na edição especial da revista *Buildings* (MDPI). O artigo publicado é apresentado na sequência.

SOMER, J. G.; SANDOVAL, G. F. B.; POSSAN, E. Low-Carbon Cements and Construction Durability: A Systematic Review. *Buildings*, v. 16, n. 16, 3197, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings16163197.

buildings

MDPI

Systematic Review

Low-Carbon Cements and Construction Durability: A Systematic Review

Juliana Gaio Somer [1,*], Gersson F. B. Sandoval [2] and Edna Possan [1]

[1] Latin American Institute of Technology, Infrastructure and Territory (ILATIT), Interdisciplinary Postgraduate Program in Energy and Sustainability (PPGIES), Federal University of Latin American Integration (UNILA), Paraná 85867-970, Brazil
[2] Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Tunja, Boyacá 150003, Colombia
* Correspondence: jg.somer.2019@aluno.unila.edu.br

Abstract

The cement industry accounts for approximately 7% of global anthropogenic CO_2 emissions, making clinker reduction, alternative binders, and carbon use and capture technologies essential mitigation strategies. However, decarbonization based on the replacement of clinkers with supplementary cementitious materials or alternative binders generally adjusts the materials' physicochemical properties and reactivity. As these actions may have implications for durability and performance throughout the life cycle, this paper presents a systematic review, based on the Methodi Ordinatio approach, of studies published in the last decade in indexed databases that examine the relationship between low-emission cements, durability, and service life. Of 48 selected articles, most focused on quantifying CO_2 avoidance through clinker reduction, without comprehensively addressing the use phase. When present in the literature, durability is found in studies of chloride penetration and carbonation resistance. However, no integrative chain studies or long-term studies focused on the durability of less emissive cement-based materials were identified. Across the reviewed studies, durability was mainly associated with changes in pore structure, hydration products, transport properties, and matrix alkalinity. Fine and reactive additions may promote pore refinement and restrict the ingress of aggressive agents, whereas extensive clinker replacement and portlandite consumption may reduce the alkaline reserve and increase carbonation susceptibility. However, these relationships are strongly dependent on binder composition, replacement level, and curing conditions, and were rarely evaluated together over sufficiently long periods.

Keywords: service life; clinker; concrete; net zero; decarbonization

Check for updates

Academic Editor: Cinzia Buratti

Received: 4 July 2026
Revised: 7 August 2026
Accepted: 10 August 2026
Published: 12 August 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

1. Introduction

The civil construction sector is responsible for a significant share of global anthropogenic atmospheric emissions—Portland Cement (PC) production alone accounts for approximately 7% of global carbon emissions. This necessitates technical and scientific strategies on the path toward carbon neutrality, projected for 2050 [1–3]. To mitigate environmental impacts, the cement sector has implemented various strategies to reduce CO_2 emissions from its products and processes. Among these, the strategies that contribute most significantly to reaching climate targets at a low cost, in order of implementation, are reducing the use of clinker in PC manufacturing by substituting it with Supplementary Materials [4–6]; increasing energy efficiency in the cement production process [7–9]; and

carbon capture, storage and utilization (CCUS) [3,10], which possess distinct characteristics and technological maturity levels [11].

Cements categorized as low-emission generally achieve this status by reducing their clinker content, as the clinker production process accounts for 55% to 70% of total process emissions [12–14]. In this context, the international outlook is for the clinker/cement ratio to reach between 0.52 and 0.57 by 2050 [3,15], while in Brazil, this ratio is currently 0.66, with emissions of around 564 kg of CO_2 for every ton of cement produced [4], as illustrated in Figure 1. The red point represents Brazil's clinker ratio in 2026. Global cement production is still expected to grow slightly over the next decade, with a small decline starting in 2035, while clinker content will be reduced. In Brazil, the actual consumption is projected to continue growing until 2050.

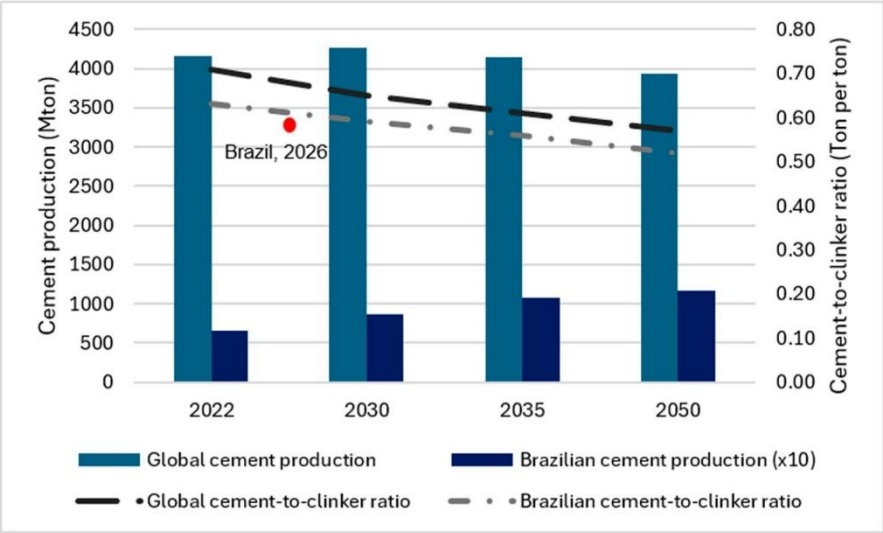


Figure 1. Correlation between global and Brazilian production outlooks and the clinker factor in cement. Source: Adapted from IEA, 2023 and SNIC; ABCP, 2019 [4,15].

Among the partial clinker substitutions in low-emission cements, supplementary cementitious materials (SCMs) such as pozzolans, slag, fly ash, and carbonate materials stand out, as they have well-established technical performance and are widely used commercially [8,13,16]. In parallel, research on new SCMs and alternative binders, such as construction and demolition waste (CDW) [17], biomass ash [18,19], low-emission geopolymer cements [20,21], supersulfated cements [22], and LC3 (limestone calcined clay cement) [23,24], for example, has demonstrated significant potential for mitigating atmospheric emissions, reaching up to 40% when compared to PC [25]. Conversely, despite scientific advances associated with such materials, their global market penetration remains limited. Recent studies have expanded the discussion to also consider emissions associated with the maintenance and rehabilitation of concrete structures [26] and the use of alternative materials, such as natural fibers [27,28].

The incorporation of SCMs modifies the material's physicochemical characteristics and, consequently, its chemical reactions (kinetics), resulting in a product with distinct properties for application in cement-based materials [29–31]. In many cases, these changes in cement characteristics can yield benefits, such as promoting void reduction (pore structure refinement) through the addition of finer materials, thereby increasing the concrete's initial

strength [17]. On the other hand, a reduction in the most reactive phases, primarily C_3S and C_3A, is observed. When the added SCM is silica-rich, changes in hydration kinetics, C-S-H formation, and portlandite consumption may result in lower alkali content and reduced concrete pH, directly influencing the durability of construction [32–34].

Regarding the large-scale application of low-carbon cements and binders under development, the barriers to be overcome include the scarcity of clinker substitutes, logistics, adaptations in industrial processes, and the fact that many scientific studies are conducted in isolation, making it difficult to understand the full scope of the studied materials' applicability [35,36]. Additionally, other challenges to be overcome include associated costs, potential difficulties in use and application due to the chemical changes the materials cause, and evidence regarding durability and a product's life cycle [33,37].

Durability can be defined as a structure's capacity to resist physical, chemical, and mechanical degradation mechanisms, thereby maintaining performance throughout its service life [32,38]. The traditional model for assessing this consists of standardized laboratory tests such as carbonation, permeability, sulfate attack, freeze–thaw cycles, chloride penetration, and, in some cases, accelerated tests that simulate long-term use [39,40]. Additionally, compliance monitoring is conducted through longitudinal data collection spanning decades. Both types of information enable the development of predictive models that, in addition to serving as a reference for the structure under study, also support standards published by respected regulatory bodies [5,36]. Increased concrete durability is associated with adjustments in the formulation of cementitious materials and structural elements [41,42]; this may be a direction for concentrating efforts aimed at updating current standards, including those focused on alternative binders [43,44], and for understanding if the proposed tests and modeling still meet the products currently offered to the market.

In reinforced concrete structures, corrosion of steel reinforcement is the most common cause of structural deterioration [1,45–47]. Simplistically, this occurs because the concrete covering the reinforcement fails to fulfill its function of adequately protecting it from corrosion-promoting elements, allowing the entry of aggressive agents present in the environment that penetrate and diffuse through the cement paste [1,41,47,48]. The number and size of pores and the chemistry composing the cement matrix structure, associated with the building's exposure environment, are examples of factors linked to material durability [38,49] that are not yet fully understood in concretes made with low-emission cements [50,51].

Cracking and shrinkage are also common problems in concrete, often caused by delayed ettringite formation (DEF), alkali–aggregate reaction (AAR), or sulfate attack. DEF is associated with high curing temperatures, which can be exacerbated by the type or fineness of the clinker substitute material [38,52,53]. AAR is characterized by the formation of an alkali gel that, due to its expansive properties, exerts internal stress on the concrete, leading to cracks [54,55], which can be even more common in concrete with a high water/cement ratio [38]. In low-emission cements, alkali-rich SCMs in clinker substitution can drive AAR formation, whereas silica fume rich materials can mitigate this phenomenon [32,38]. Attacks by the presence of sulfur (sulfates and sulfites) can be favored by a mechanism like AAR: if the material added for decarbonization is sulfur-rich [49] and then it is aggravated in more permeable concretes [38].

What all potential problems in low-emission cements that could lead to premature structural degradation have in common is that the state of the art for these types of materials has not yet been reached, and the recovery of structures with these pathological manifestations is usually difficult, often costly, and may limit the acceptance of new products [25]. In research on various types of low-carbon cements, in general, not all durability tests associated with traditional PC are performed [22,50,56,57]. In other cases, it is questioned

whether traditional methodology can be applied to low-emission cements [39,50,58], and there are still situations where the product under study shows excellent results in some aspects but does not meet the minimum requirements in others, especially based on the clinker substitution percentage [25,56,57,59].

Recognizing the need for technological advances to decarbonize the PC chain and considering that the service life of concrete structures is a central premise of sustainability, this article presents a systematic literature review that correlates these variables and investigates how building durability has guided the development of low-carbon cements. The central research question is to assess whether durability issues are being analyzed in the cement decarbonization process, especially concerning Portland cement. We also seek to identify the durability indicators and predominant testing methods in the consulted literature, since the literature [36,60,61] indicates that sustainable concrete is durable concrete. Thus, these questions arise from the premise that, to decarbonize PC, physical–chemical alterations in the material are sometimes necessary, which may have long-term implications, especially for the durability and service life of cement-based materials and structures.

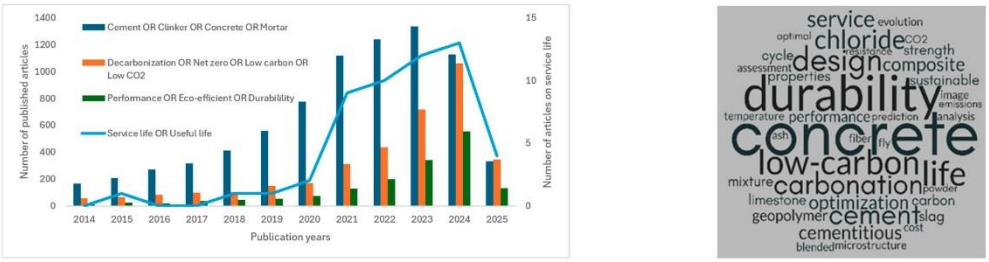
2. Methodology

The systematic literature review was conducted and reported in accordance with the PRISMA 2020 statement (Supplementary Materials). The search was carried out in the Scopus and Web of Science (WoS) databases, selected for their large number of publications in engineering, construction technologies, materials science, and sustainability. Keyword combinations were structured in four conceptual blocks (material, decarbonization, performance and service life), combined with the Boolean operators "OR" and "AND" and the wildcard character "*", and applied to title, abstract and keywords. Filters were restricted to journal articles and review articles published between 2014 and 2025 in English. Both searches were executed on 19 March 2025. The complete search strings, fields, filters, and number of records retrieved per database are presented in Supplementary Materials—Table S3.

Eligibility criteria were defined as a priori. Studies were included if they were original research or review articles published in peer-reviewed journals, written in English, published between 2014 and 2025, and focused on decarbonization strategies for cementitious materials while reporting data on performance, durability, or service life. Duplicate records, studies addressing non-cementitious materials, and studies focused on demolition processes were excluded. The initial strategy yielded 95 articles (WoS: 53; Scopus: 42), which were added to the Mendeley free reference manager. After duplicate removal (42 between databases and 2 entries within the same database), 51 unique papers remained. Titles, abstracts, and keywords were screened against the eligibility criteria, and 3 papers were excluded for not addressing the scope of this review (Supplementary Materials—Table S2). The remaining 48 reports were retrieved, and all were retained. The selection process is summarized in the PRISMA 2020 flow diagram (Supplementary Materials—Figure S1). Full-text assessment and data extraction were performed by a single reviewer (first author). Consequently, no procedure for resolving disagreements between reviewers was applicable. To mitigate the risk of selection bias, eligibility criteria were defined as a priori, and records of uncertain eligibility at the title/abstract stage were retained for full-text assessment. The distribution of publications by year according to the successive keyword refinements is presented in Figure 2a, while terms occurring at least three times are shown in Figure 2b.

The 48 eligible studies were ranked using the Methodi Ordinatio framework, which consists of selecting and classifying articles based on their scientific relevance, measured by the result of an InOrdinatio equation. This equation combines the journal's impact factor, the number of citations, and the year of publication [62]. The α parameter, which

weighs the publication year in the equation, was set to 10, assigning maximum weight to recency, since technological advancement is a critical factor for this research. To rank the studies, an Excel spreadsheet was used, considering each journal's impact factor, the year of publication, and the number of citations [62] obtained from Google Scholar. No cut-off score was applied; all 48 studies were retained in the corpus, and the ranking was used to prioritize the reading. The complete ranking is provided in Supplementary Materials—Table S1. The InOrdinatio score reflects bibliometric relevance and does not constitute an assessment of methodological quality or risk of bias. Section 3 is based exclusively on the 48 studies selected through the systematic search. Additional technical reports and sectoral documents are cited only to provide conceptual background and were not included in the Methodi Ordinatio ranking. The methodological quality and risk of bias of the 27 primary experimental studies were appraised with a pre-specified five-domain instrument, with each domain rated Low, Moderate or High: reference/control mixture, replication, standardized test method, adequacy of exposure duration, and completeness of mix and curing reporting. Thresholds were fixed before assessment and applied identically to all studies, and an overall rating was derived by a set rule (criteria in Supplementary Materials—Table S4). Reviews and numerical, LCA, or machine learning studies were not appraised. To mitigate single-reviewer screening and extraction, a second author independently re-applied the instrument to ~25% of studies, with full agreement.



(**a**) (**b**)

Figure 2. (**a**) Number of publications by year according to the successive keyword refinements; (**b**) word cloud of terms occurring at least three times.

3. Results and Discussion

Among the selected articles, it can be observed that, rather than evaluating the durability of existing low-emission PC-based materials, the primary focus of the publications is on assessing the durability of low-carbon materials under development (new materials), particularly under aggressive environmental conditions. Regarding the methods for obtaining results, the main division lies between simulations, models, and/or applied testing. The possibilities for decarbonizing the cement industry range from cement manufacturing to concrete use, as detailed below.

To maintain analytical consistency, the evidence is discussed at three interconnected levels: binder chemistry and clinker-reduction strategies; mechanical, microstructural, and durability performance of cement-based materials; and service-life and life-cycle implications. Fibers, aggregates, coatings, CCUS-related exposure, and building-scale considerations are discussed only when they directly affect the performance or environmental assessment of low-carbon cementitious systems.

3.1. Geopolymers

In the analyzed publications, the focus is primarily on evaluating mechanical performance and resistance to aggressive environments. While one group of researchers [63] focused on structural improvement through the incorporation of steel fibers (0.5%), another [64] considered the reuse of geopolymer concretes as coarse aggregates in environments subject to freeze–thaw cycles. The evidence pertains to the influence of the precursor type and curing conditions on mechanical strength and durability; aggregates derived from fly ash concrete did not perform well in the evaluation, whereas the best results were found for the recyclability of concretes made with metakaolin, red mud, and slag, which was associated with the density and chemical properties of these materials. Two other groups focused on the effects of corrosive environments on geopolymer concrete. In one study involving steel-reinforced geopolymer concrete, the applied tests, modeling, and neural network algorithms led to the conclusion that when observing chloride content, humidity, and temperature, the latter was the most relevant factor in inducing reinforcement corrosion, followed by humidity and chloride content [65]. The other study reported positive results on the use of fibers and nanomaterials to enhance the mechanical resistance of geopolymer concrete to chloride attack, thereby increasing its durability [20].

The full replacement of PC with geopolymer binders has been explored in coating applications, focusing on contact angle, surface energy, mechanical properties, and microstructure [66]. The results indicated that the substituents under study had hydrophilic properties like PC and that the test results were positive regarding material porosity, with the advantage of reducing environmental impacts by 50% to 80% in the highest-impact categories, according to the Life Cycle Assessment (LCA) performed [66]. Although this research is relevant to the development and application of technology, none of the studies systematically observed the use and service life of the construction.

3.2. Limestone-Based and Calcined Clay Cements

As a low-clinker alternative, LC3 (Limestone Calcined Clay Cement) is a ternary blended cement composed of calcined clay (~30%), limestone (~15%), clinker (~50%), and gypsum (~5%). The synergistic reaction between metakaolin and calcium carbonate in the presence of calcium hydroxide enables a clinker factor reduction of approximately 50% compared to ordinary Portland cement, without compromising mechanical performance [23,24,67]. Limestone-based cements are composed of limestone filler and clinker without calcined clay [68].

The reported benefits of this cement include a reduction in atmospheric emissions by replacing a portion of the clinker [69,70], a decrease in concrete porosity [14,70,71], a reduction in carbonation depth, and consequently, reinforcement protection [69], as well as improved clinker reactivity [69]. Due to these positive characteristics, it has been a subject of study, with results demonstrating a delay in the development of expected compressive strength and greater carbonation depth, which can be detrimental to reinforced concrete due to the increased risk of reinforcement corrosion [72]. Therefore, concrete produced with the cements reported in this article can be highly useful in applications where initial strength is not a primary requirement or where there is low exposure to air, such as foundations, pipelines, and similar structures.

Additional research has sought to determine the optimal clinker substitution level in LC3 systems or limestone-based cement, balancing mechanical performance and carbonation control [14,73]. Findings indicate that the criteria for using LC3 differ between low-strength concretes (25 MPa), where carbonation must be considered, and high-strength concretes (45 MPa), where mechanical strength predominates [73]. Mixtures combining PC with fly ash showed strength increments of approximately 20.5% and a 21.1% reduction in

CO_2 emissions compared to concrete produced with PC and filler [14]. Complementary strategies, such as the incorporation of microcapsules for self-healing, demonstrated the potential for sealing surface cracks with widths exceeding 0.4 mm within 72 h [71]. However, in studies with high-strength concrete, results indicated that even after healing, the hydration products formed were brittle, making them prone to re-cracking under load [74].

3.3. Cements with Pozzolanic Additions

The use of SCMs, specifically off-specification fly ash and glass spheres, for lightweight concrete was evaluated in high-performance concrete under flexural load tests to assess mechanical behavior and LCA [75]. The mechanical test results were satisfactory, with crack widths remaining below standardized limits. Atmospheric emissions were reduced by up to 20%, the largest fraction of which stemmed from clinker substitution [14], and by up to 58% due to reduced maintenance requirements [75]. However, LCA is limited to concrete production and does not account for the service life or maintenance requirements of a construction project using this low-carbon cement.

Nanosilica is an SCM that has been explored, particularly because small additions can significantly improve concrete's mechanical properties, especially in aggressive environments, due to its high resistance to sulfate attack [76,77]. Beyond environmental sustainability benefits, some properties of nanosilica are analogous to those of limestone powder, such as reducing concrete pores through particle packing and assisting reinforcement preservation. Regarding the challenges in large-scale application of this material, the lack of long-term durability studies, dosage standardization, and application systematization stands out [76]. For the full range of SCMs, microstructure and macroscopic properties need to be evaluated in detail, including extreme situations such as high temperatures [78]. Natural pozzolans are emerging as an alternative SCM to fly ash, with satisfactory results in workability, strength, water absorption, and chloride diffusion [79].

Focusing on material durability, studies on concrete made with low-carbon cement incorporating 30% fly ash or 50% slag found that resistance to chloride attack was higher than in PC concrete at the same water/cement ratio [80]. Although the research focus is on the durability of low-emission cements, there is a stated concern regarding the lack of standardization in codes for certain types of potential clinker substitutes, especially construction waste rich in compounds that remain poorly understood [58,80].

3.4. Complementary Material- and Application-Level Strategies

In the line of new product development, studies were conducted to improve the freeze–thaw performance of expanded polystyrene (EPS) concrete, which possesses excellent thermal insulation but unsatisfactory freeze–thaw performance. In this regard, EPS beads were coated with different materials; testing and modeling found that EPS concrete with beads coated with water-based polyurethane and high-performance concrete showed a 60% increase in freeze–thaw resistance compared to uncoated EPS [81]. Although the authors cited its use in low-rise buildings and certain engineering applications, they also noted that studies on its durability are scarce [81], which may act as a strong deterrent to the popularization of this low-carbon material.

Low-heat expansive cement (LHEC) is presented as a material with the potential for wide use in humid environments, such as dams, as a replacement for PC. Beyond lower CO_2 emissions, since it is primarily composed of granulated blast-furnace slag, its main advantages include high strength, low heat of hydration, and micro-expansion performance [82]. A challenge of this material still to be overcome is delayed ettringite formation (DEF), which can cause structural cracking [38]; gypsum was added to address

this. Promising results indicate the need to not only add gypsum but also to control curing temperatures to minimize DEF [82].

The use of carbon fiber reinforcement to enhance mechanical performance in low-emission concretes was conducted by two research groups [83,84]. In the first study, the focus was on cement paste with an extremely low water/cement ratio, leading to the conclusion that compressive and tensile strength, freeze–thaw resistance, and drying shrinkage were increased, while freeze–thaw resistance was reduced. Based on these findings, an increase in the service life of structures with these characteristics was inferred [83]. In a specific application for railway sleeper production, a niche market requiring high early strength, prestressing, and mandatory reinforcement, pieces were produced using low-emission concretes. These were evaluated for both partial PC replacement and reinforcement with polyurethane and carbon fiber [84]. The highly detailed decarbonization potential assessment indicated that good mechanical performance could be achieved with cements featuring up to 50% clinker substitution by natural pozzolans, resulting in up to 54% fewer atmospheric emissions in the sleepers. However, this reduction will only be achieved if the production of carbon fibers and polyurethane also follows a decarbonization trend; otherwise, the environmental benefits of cement substitution may be progressively lost [84]. Although this application is focused on the railway market, the author's conclusion addressed a point seldom discussed in other articles: the evaluation of real reduction potential must be comprehensive.

Regarding coarse aggregates within the decarbonization line, one study indicated the use of bamboo as an aggregate and focused on mechanisms to overcome material segregation in concrete [85]. While the research is relevant, it brings little contribution regarding zeroing emissions or observing product service life. Similarly, a study was retrieved on grouting materials with additives that increase durability in aggressive environments, with an average carbon emission of 84.86 kg/ton, compared with 280–767 kg/ton in similar studies, significantly reducing atmospheric emissions [86].

There is also research focusing on durability and, in a very particular report, on accelerated carbonation caused by leaked stored CO_2 [87], which, with the advent of CCUS technology, may become commonplace. The study was motivated by an incident recorded during tunnel construction in China. A CO_2 leak was detected, and it was observed that the high gas concentration, coupled with elevated pressure, caused rapid and deep carbonation of the concrete, resulting in structural damage and loss of strength due to reinforcement corrosion [87]. The research focused on evaluating concrete under various CO_2 concentrations and pressures, with different relative humidities. The results showed that although a carbonation front can be beneficial to concrete's compressive strength [38], when the CO_2 partial pressure reaches 1000 kPa, severe structural damage can occur due to induced carbonation [87]. The approach in this article points toward an issue surrounding the advancement of CCUS and its potential leaks.

In this stage of the analysis, it was observed that there is a lack of standardization for minimum criteria in conducting research, which often makes literary comparison impractical. Although authors strive for durability in their research, in most cases, it is not possible to compare measurements between the conventional product and the one under study. This is a point of attention that must be addressed for the integration of low-carbon cements into the market, as integrating decarbonization and durability is strategic for all stakeholders in the PC chain, from production to application [61].

3.5. Predictive Modeling and Simulation

Although the development of modeling for predicting the durability of cementitious materials is not new [88,89], the subject has been extensively explored by research groups,

especially with the advent of Artificial Intelligence algorithms and the use of varied and combined SCMs. However, one question is whether traditional durability models remain applicable to cements with reduced clinker content [50,58]. Conversely, the use of digital tools and neural networks can accelerate the development of decarbonized products.

Selected publications report simulations for the strength of concrete produced with low-carbon cement (using different SCMs) based on carbonation time [90–92]. The conclusions indicate that for concretes with strength up to 40 MPa, carbonation durability is the criterion for service life, whereas compressive strength is the decisive factor in concretes with strength exceeding 50 MPa [90,92]. In simulations where metakaolin was the SCM used, establishing premises for concrete strength and carbonation service life, alongside optimal mix criteria combining emission reduction and product cost, it was concluded that to meet the requirements, SCM use was minimal because the cost of metakaolin is higher than that of PC [91]. In turn, simulations combining SCMs (metakaolin, fly ash, limestone powder) indicate that a blend of these SCMs can lead to better outcomes in controlling maximum atmospheric emissions, maximum heat of hydration, and concrete electrical resistivity [93].

In other research, a modeling study aimed to identify the optimal SCM use and water/cement ratio, using compressive strength, additive use, and atmospheric emissions as parameters [94]. The results indicated that a lower water/cement ratio with fly ash addition increased compressive strength and CO_2 emissions; the application of the models enabled a detailed combination of these variables [94].

With a more integrated perspective, one simulation simultaneously considered economic, environmental, mechanical, and durability factors [95]. The authors highlighted a gap in most published models regarding the rigidity of input parameters such as costs, availability, and the environmental sustainability of materials. The presented case studies indicate that the most relevant factors in achieving concrete with optimal characteristics are the cost of each component, including SCMs, and the environmental aggressiveness class of the application [95]. Furthermore, the proposed simulations appear highly useful, particularly by enabling regionalized solutions, an extremely important factor for SCMs.

The proposal for hybrid steel–concrete prefabricated modular buildings was the starting point for a study that modeled the service life of such constructions, using PC with partial clinker replacement by SCMs, ultra-lightweight cement, and foam concrete [96]. In addition to evaluating the behavior of the construction material itself, the authors advocated design-related concepts, such as using concrete with thermal performance that reduces users' electricity consumption during the building's occupancy. This concern is highly relevant and has been noted by other researchers who support the application of engineering concepts as mechanisms for decarbonization [97,98], given that data indicates that up to 38% of energy-associated CO_2 emissions stem from the built environment [99]. Thus, the prefabricated modular structure was studied with respect to cost requirements, carbon emissions, and energy consumption throughout its service life, alongside the effects of extending service life and overall performance. The authors provided comprehensive and important conclusions on atmospheric emission reductions, the circular economy, and construction efficiency [96]. One aspect not clearly addressed in other studies but defended as a premise in this one is that durability is key to the circular economy; in this regard, the researchers further simulated scenarios to extend the service lives of buildings to 100 and 150 years. The main findings included reductions of up to 17% in energy consumption during occupancy and up to 14% in CO_2 emissions, with a service life extended to 150 years [96].

Regarding concrete durability requirements, there is the concept of "designed concrete," which features a defined standard for the minimum strength class, required consis-

tency, water/cement ratio limits, minimum content, and permitted cement types, linked to chemical aspects, in addition to factors such as aggregates, additives, and concrete curing [38]. Assuming these truths, modeling or propositional scenarios should, at a minimum, consider these variables to evaluate product quality.

3.6. Life Cycle Assessment (LCA) and Durability

Although LCA constitutes a central tool for measuring environmental impacts throughout the life cycles of products from a sustainability perspective [100], until the last decade, the influence of the durability of low-carbon concrete structures on the results of this type of analysis was not clear [41]. The primary effect has been the development of divergent assessment approaches, which consequently yield very distinct results, ranging from 84 to 612 kg of CO_2 equivalent per m^3 of low-emission concrete [101,102].

The main durability indicators of a structure stem from the project's acceptance requirements, either prescriptive or associated with verified performance [41], and both are governed by relevant standards [103]. Prescriptive requirements are linked to the type of environment or exposure class, for which there are indications regarding materials and concrete cover thickness; for example, it is assumed that meeting these prescriptions will achieve the design service life. In contrast, performance requirements focus on meeting given conditions before reaching a limited state, such as carbonation depth, resistance to chemical attacks, and the natural chemical reactions of concrete. For these, testing and modeling are typically conducted to predict the service life of materials [41].

Among the analyzed articles, 27 involved testing related to the durability and performance of concrete or mortar (Table 1). The evidence is concentrated on short-term laboratory performance: 13 studies (48.1%) were limited to periods of ≤28 days, a short timeframe for durability, whereas only three (11.1%) extended beyond one year. In terms of scope, six studies (22.2%) evaluated a single property, usually a mechanical indicator, while five (18.5%) jointly assessed mechanical, chemical, and microstructural characteristics, representing a more comprehensive analysis. Consistent with this, 15 of the 27 experimental studies were rated as having a high risk of bias, whereas only six were classified as low-risk, driven mainly by short exposure durations and limited or unreported replication (Supplementary Materials—Table S4). Together, these results demonstrate that the available evidence is concentrated on short-term laboratory performance and remains insufficient for robust conclusions regarding long-term service life.

Table 1. Summary of the tests performed and properties evaluated in the analyzed studies.

Material Used	Properties				Test Time	Ref.
	Physical and Rheological	Mechanical	Chemical	Microstructural		
Reinforced concrete (PC with pozzolan and slag)	-	-	Chloride resistance	-	9 Years	[80]
Mortar (PC and low-heat expansive cement)	-	Compressive Strength Deformation	-	Hydration morphology Hydration products Crystalline structure	120 Days	[82]
Reinforced concrete (PC with pozzolan)	Density Water absorption Electrical resistivity Workability	Compressive Strength Deformation Tensile	Carbonation Chloride resistance	-	90 Days	[79]
Ternary Portland cements and mortar	-	Compressive Strength	Carbonation	-	20 Months	[72]
Reinforced waste-based geopolymer foam concrete	-	Tensile	-	-	90 Days	[65]
Concrete (PC)	-	Compressive Strength	Carbonation	Hydration morphology	28 Days	[87]

Table 1. *Cont.*

Material Used	Properties				Test Time	Ref.
	Physical and Rheological	Mechanical	Chemical	Microstructural		
Mortar (LC3)	-	Compressive Strength	Chloride resistance	Pore size	28 Days	[71]
Expanded polystyrene (EPS) concrete	-	Compressive Strength Freeze–thaw	-	Pore structure	275 freeze–thaw cycles	[81]
Fiber-reinforced (CP) and LC3 concrete	-	Freeze–thaw	-	Hydration products Pore size	48 Days	[74]
Pastes and mortar (PC with fly ash and slag)	-	-	Carbonation	Depth and direction of carbonation	3 Months	[33]
Reinforced concrete (PC with fly ash and slag)	Humidity	-	-	-	10 Months	[42]
Cement pastes (PC with fly ash, limestone and metakaolin)	Electrical resistivity	Compressive Strength	Heat of hydration CO_2 emission	Crystalline structure	28 Days	[93]
Concrete (PC)	-	-	-	Phase distribution	28 Days	[85]
Cement paste (PC with colloidal nano-silica)	Workability	Compressive Strength	-	Hydration morphology Hydration products Pore structure	28 Days	[77]
Geopolymer paste (with steel fiber and ceramsite)	-	Compressive Strength Deformation	-	-	28 Days	[63]
Cement paste (PC with limestone powder)	Workability	Compressive Strength	Carbonation	-	540 Days	[73]
Cement paste (PC with slag)	Workability	Compressive Strength Freeze–thaw	-	-	28 Days	[104]
Cement paste (coal slag and steel slag)	Workability Setting time	Compressive Strength Deformation	-	Phase distribution Hydration products	28 Days	[86]
Geopolymer concrete (with fly ash, red mud and slag)	-	Compressive Strength Freeze–thaw	-	Phase distribution Pore structure	28 Days	[64]
Geopolymer mortars (with slag, red mud, metakaolin and fly ash)	-	Interfacial adhesive strength	Hardness	Functional Group	1 Year	[66]
Reinforced concrete (PC with pozzolan)	-	Compressive Strength Deformation Tensile	-	-	28 Days	[84]
Cement paste (PC) reinforced with carbon fiber	Density Water absorption	Compressive Strength Deformation Tensile Freeze–thaw	Drying shrinkage	-	150 Days	[83]
Ultra-high-performance concrete (PC with slag) reinforced with fibers	-	Deformation	-	-	28 Days	[75]
Natural fibers in epoxy base	-	Tensile	-	-	1 Day	[28]
Mortars (PC with fly ash, limestone filler, pozzolan and slag)	Water absorption Electrical resistivity	Compressive Strength Deformation	Chloride resistance Carbonation	-	90 Days	[1]
Concretes (PC with fly ash and slag)	Water absorption	Compressive Strength	Chloride resistance	Crystalline structure Hydration products Hydration morphology	90 Days	[5]
Concretes (PC with silica, calcined clay and limestone)	Density	Compressive Strength Deformation	Carbonation Thermal conductivity	-	28 Days	[96]

Overall, the reviewed evidence indicates that the durability of low-carbon cementitious materials is governed not only by the clinker-replacement level but also by the resulting changes in pore connectivity, hydration products, transport properties, and matrix alkalinity. Systems in which fine or reactive additions promoted pore refinement, reduced water absorption, increased electrical resistivity, or generated denser hydration products generally exhibited improved resistance to chloride ingress and freeze–thaw exposure [5,64,77,79,81]. Conversely, high clinker-replacement levels accompanied by portlandite consumption and reduced alkaline reserve were associated with greater carbonation susceptibility, particularly when pore refinement and strength development were insufficient [33,72,73]. These relationships were strongly influenced by the type and proportion of the supplementary

cementitious material, the water-to-binder ratio, and the curing conditions. Nevertheless, because only five studies jointly evaluated mechanical, chemical, and microstructural properties and only three extended the assessment beyond one year, these relationships should be interpreted as qualitative tendencies rather than universal correlations.

Across the reviewed binder systems, the most consistent positive evidence concerned chloride resistance in mixtures containing fly ash, slag, natural pozzolans, or fine additions that promoted pore refinement [64,79,80]. Carbonation performance was more variable because the beneficial effect of pore refinement may be counterbalanced by reduced portlandite availability and lower pH-buffering capacity at high clinker-replacement levels [34,72,73]. Evidence regarding sulfate resistance was limited and heterogeneous [59,76,77], while long-term service-life reliability remained insufficient across all binder families. Accordingly, the available evidence does not support identifying any low-carbon cement system as universally reliable across all exposure conditions.

The lack of standardization for LCAs that collectively encompass concrete structures, combined with the fact that current standards do not necessarily cover low-carbon cements, underscores the existing gap in the field. Furthermore, the absence of a clear approach connecting durability with the LCA of low-carbon concretes can lead to contradictory and biased conclusions [41,56,102]. In the research conducted by [105], the authors reported on the difficulties in obtaining experimental data to account for the increased mechanical strength and durability of alternative materials compared to PC concrete. This raises doubts about real decarbonization, as the environmental and economic performance of materials is directly linked to the properties that determine a structure's service life [105].

4. Trends, Research Gaps and Perspectives

The main pathways of the cement sector, whether currently implemented or under implementation to reach Net Zero, include plant energy efficiency, co-processing, the replacement of fossil fuels, and the reduction in clinker content in cement. However, due to issues inherent to the raw material, especially the limestone decarbonation process, the cement industry will depend on carbon capture actions to achieve the neutrality goal. Estimates across various roadmaps [2,4] suggest that approximately 40% of the decarbonization target is linked to CCUS; however, implementing the necessary carbon capture technologies poses a significant challenge due to associated costs.

The physicochemical consequences of cement decarbonization are binder-specific and may involve changes in hydration kinetics, phase assemblage, pore structure, transport properties, and matrix alkalinity. These changes can improve resistance to aggressive-agent ingress through pore refinement but may also increase carbonation susceptibility when clinker reduction substantially decreases portlandite availability and pH-buffering capacity [32–34,72,73]. Published studies have predominantly focused on newly developed cementitious materials and alternative binders, such as LC3 and geopolymers, whereas the durability implications of reducing the clinker content of commercially available Portland cements remain comparatively underexplored.

The current outlook demands innovation, scientific–technological development, stakeholder training across the cement and concrete chains, financial investment in research and companies, and local and global regulatory standards and public policies to support the achievement of the sector's zero-emission objective. Significant progress is required in conducting systemic and networked research focused on the durability and service life of products derived from decarbonized Portland cement (Figure 3). The use of machine learning tools and computational intelligence is of great interest for data analysis, correlation, and system modeling.

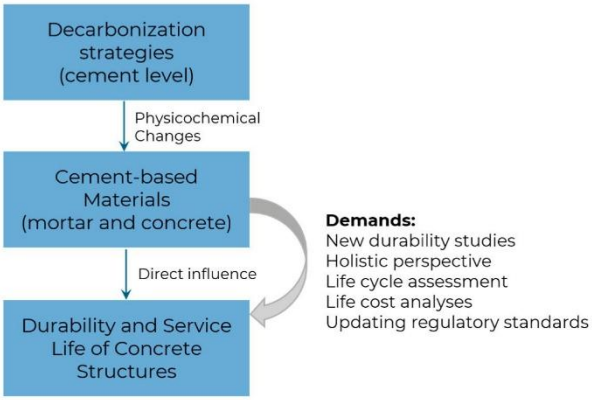


Figure 3. Summary of the implications of decarbonization in cement and the demands generated.

The main decarbonization pathways focus on cement, the basic raw material of the construction chain, but pay little attention to potential implications in the material's application processes, such as optimizing cement consumption in concrete manufacturing and extending the service life of elements and structures [3,41,98,103]. Some studies demonstrate that extending the service life of construction can contribute to meeting the sector's global emission targets by 4–15% [41,98]; this is a vital agenda for the effective decarbonization of Portland cement sector. Systematic studies are needed to address the trade-off between CO_2 reduction and durability throughout the life cycle of concrete structures [61], to avoid shifting the problem from cement to concrete, which would result in indirect emissions associated with frequent maintenance or premature reconstruction.

5. Conclusions

The reviewed literature predominantly focuses on reducing emissions associated with cement production; however, it does not provide a comprehensive quantification of the contribution of materials to decarbonization throughout their life cycle. Methodological fragmentation is evident, with isolated assessments of mechanical or environmental performance failing to consistently correlate with durability, service life, and commercial-scale viability. As most durability evidence derives from short-duration, frequently single-batch tests, inferences about long-term service life should be regarded as low-certainty and preliminary. This gap reduces the robustness of conclusions and limits a safe transition to cement with lower clinker content. Part of this scenario stems from experimental constraints, high costs, and pressure to deliver rapid, novel results.

For the expected environmental gains to be effectively achieved, the implementation of low-carbon cements must be deepened, with durability requirements integrated into the process through holistic Life Cycle Assessment (cradle-to-cradle) studies. Otherwise, the undeclared systemic risk to the chain is a "trade-off": a low-carbon cement that may compromise the durability of the elements and structures produced.

For these reasons, conducting comprehensive interlaboratory studies is recommended to re-evaluate the durability implications of elements and structures manufactured with cement undergoing decarbonization. The results of this process will serve as a basis for updating regulatory standards for low-emission materials, which have direct implications for the carbon market. In parallel, technical qualifications, guidance, and monitoring for professionals working in the cement-based materials and construction chain are fundamental to ensuring specifications, applications, and controls that are compatible with the new performance requirements.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: https://www.mdpi.com/article/10.3390/buildings16163197/s1, Figure S1: Prisma flow diagram; Table S1: Included articles; Table S2: Excluded articles; Table S3: Search protocol; Table S4: Summary of experimental studies and their methodological quality/risk-of-bias assessment. Table S5. PRISMA 2020 Checklist.

Author Contributions: J.G.S.: Conceptualization, Methodology, Results and Discussion, Writing—Original Draft Preparation. G.F.B.S.: Supervision, Discussion, Writing—Reviewing and Editing. E.P.: Conceptualization, Supervision, Methodology, Discussion, Writing—Original Draft Preparation. Writing—Reviewing and Editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES), under Call No. 08/2024—PPGIES/ILATIT and supported by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), grant 308511/2022-0.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

1. Soldado, E.; Antunes, A.; Costa, H.; do Carmo, R.; Julio, E. Durability of Mortar Matrices of Low-Cement Concrete with Specific. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *309*, 125060. [CrossRef]
2. IEA; WBCSD; CSI. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*; IEA: Paris, France, 2018.
3. GCCA. *Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*; GCCA: London, UK, 2021.
4. SNIC; ABCP. *Roadmap Tecnológico Do Cimento: Potencial de Redução Das Emissões de Carbono Da Indústria Do Cimento Brasileira Até 2050*; SNIC: Rio de Janeiro, Brazil, 2019.
5. Van Deventer, J.S.J.; Nicolas, R.S.; Ismail Idawatiand Bernal, S.A.; Brice, D.G.; Provis, J.L. Microstructure and Durability of Alkali-Activated Materials as Key for Standardization. *J. Sustain. Cem. Based Mater.* **2015**, *4*, 116–128. [CrossRef]
6. Griffiths, S.; Sovacool, B.K.; Furszyfer Del Rio, D.D.; Foley, A.M.; Bazilian, M.D.; Kim, J.; Uratani, J.M. Decarbonizing the Cement and Concrete Industry: A Systematic Review of Socio-Technical Systems, Technological Innovations, and Policy Options. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2023**, *180*, 113291. [CrossRef]
7. Beguedou, E.; Narra, S.; Afrakoma Armoo, E.; Agboka, K.; Damgou, M.K. Alternative Fuels Substitution in Cement Industries for Improved Energy Efficiency and Sustainability. *Energies* **2023**, *16*, 3533. [CrossRef]
8. Scrivener, K.L.; John, V.M.; Gartner, E.M. Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO2 Cement-Based Materials Industry. *Cem. Concr. Res.* **2018**, *114*, 2–26. [CrossRef]
9. Chew, Y.E.; How, B.S.; Sunarso, J.; Moser, I.; Andiappan, V. Decarbonization of Energy Operations for Hard-to-Abate Industries Through Smart Energy System Optimization. *Process Integr. Optim. Sustain.* **2025**, *9*, 1145–1168. [CrossRef]
10. Amran, M.; Makul, N.; Fediuk, R.; Lee, Y.H.; Vatin, N.I.; Lee, Y.Y.; Mohammed, K. Global Carbon Recoverability Experiences from the Cement Industry. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, *17*, e01439. [CrossRef]
11. Sun, M.; Pang, K.; Shao, S.; Liu, D. Application, Challenges, and Prospects of CCUS Technology in Steel Industry. *J. Sustain. Metall.* **2025**, *11*, 214–231. [CrossRef]
12. Wang, Y.; Wang, Z.; Lei, D.; Zang, C.; Guo, D. Technology Verification of Portland Cement Clinker Production Driven by Concentrated Solar Energy Directly. *Renew. Energy* **2024**, *232*, 121064. [CrossRef]
13. Li, Z.; Sun, L.; Zhang, R.; Hanaoka, T. Decarbonization Pathways Promote Improvements in Cement Quality and Reduce the Environmental Impact of China's Cement Industry. *Commun. Earth Environ.* **2024**, *5*, 769. [CrossRef]
14. Thorne, J.; Bompa, D.V.; Funari, M.F.; Garcia-Troncoso, N. Environmental Impact Evaluation of Low-Carbon Concrete Incorporating Fly and Limestone. *Clean. Mater.* **2024**, *12*, 100242. [CrossRef]
15. IEA. *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*; IEA: Paris, France, 2023.
16. Chen, H.; Yang, J. A New Supplementary Cementitious Material: Walnut Shell Ash. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *408*, 133852. [CrossRef]
17. Oliveira, D.R.B.; Leite, G.; Possan, E.; Marques Filho, J. Concrete Powder Waste as a Substitution for Portland Cement for Environment-Friendly Cement Production. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *397*, 132382. [CrossRef]

18. Lei, Z.; Pavia, S. Biomass Ash (BA) Waste as an Activator to Produce Carbon-Negative Cement. *CEMENT* **2024**, *18*, 100112. [CrossRef]
19. Do Couto, Á.F.; Nogueira, G.S.F.; Sandoval, G.F.B.; Schwantes-Cezario, N.; Morales, G. Initial Study of Eucalyptus Wood Ash (EWA) as a Mineral Admixture in Concrete1. *DYNA* **2019**, *86*, 264–270. [CrossRef]
20. Li, H.; Zhang, Z.; Deng, Y.; Xu, F.; Hu, J.; Zhu, D.; Yu, Q.; Shi, C. Geopolymer Composites for Marine Application: Structural Properties and Durability. *Cem. Concr. Compos.* **2024**, *152*, 105647. [CrossRef]
21. Akbari, H.; Heller, T.; Shin, S.; Yang, X.; Kolay, P.; Kumar, S.; Mohanty, M.K. *Surface Mining Equipment Sustainable Energy in Mines Rare Earths in China Geopolymer-Based Concrete to Reduce Carbon Footprint of the Construction Industry*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013; Volume 65, pp. 57–62.
22. Escalante-Garcia, J.I.; Cabrera-Luna, K.; Castillo-Sanchez, Y.B. Blast Furnace Slag Supersulfated Cements: Composition Optimization, Microstructures, and Environmental Impact. *J. Sustain. Cem. Based Mater.* **2024**, *14*, 145–166. [CrossRef]
23. Matos, P.; Dresch, L.; Andrade Neto, J.; Bender, C.; Rodríguez, E.; Zunino, F.; Kirchheim, A.P. Effects of Clinker and Calcined Clay Mineralogy on the Hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cem. Concr. Res.* **2026**, *208*, 108316. [CrossRef]
24. Scrivener, K.; Martirena, F.; Bishnoi, S.; Maity, S. Calcined Clay Limestone Cements (LC3). *Cem. Concr. Res.* **2018**, *114*, 49–56. [CrossRef]
25. Barbhuiya, S.; Das, B.B.; Adak, D.; Kapoor, K.; Tabish, M. Low Carbon Concrete: Advancements, Challenges and Future Directions in Sustainable Construction. *Discov. Concr. Cem.* **2025**, *1*, 3. [CrossRef]
26. Sánchez-Garrido, A.J.; Navarro, I.J.; Yepes, V. Sustainable Preventive Maintenance of MMC-Based Concrete Building Structures in a Harsh Environment. *J. Build. Eng.* **2024**, *95*, 110155. [CrossRef]
27. Saini, K.; Matsagar, V.A.; Kodur, V.R. Recent Advances in the Use of Natural Fibers in Civil Engineering Structures. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *411*, 134364. [CrossRef]
28. Helaili, S.; Chafra, M. Identification of Mechanical Properties of a Braided Alfa Stem (*Stipa tenacissima* L.) by an Inverse Method. *J. Compos. Mater.* **2023**, *57*, 443–450. [CrossRef]
29. Aïtcin, P.C.; Wilson, W.; Mindess, S. Concrete in Canada: 50 Years of Progress—Present Concerns. *Can. J. Civ. Eng.* **2018**, *45*, 117–124. [CrossRef]
30. Kipkemboi, B.; Zhao, T.; Miyazawa, S.; Sakai, E.; Nito, N.; Hirao, H. Effect of C3S Content of Clinker on Properties of Fly Ash Cement Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117840. [CrossRef]
31. Bramha Chari, K.J.; Ranga Rao, V. Durability and Microstructure Characteristics of Concrete with Supplementary Cementitious Materials. *Civ. Eng. J.* **2022**, *8*, 683–694. [CrossRef]
32. Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3rd ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2006.
33. Zhang, K.; Yio, M.; Wong, H.; Buenfeld, N. Development of More Accurate Methods for Determining Carbonation Depth in Cement-Based Materials. *Cem. Concr. Res.* **2024**, *175*, 107358. [CrossRef]
34. Lothenbach, B.; Scrivener, K.; Hooton, R.D. Supplementary Cementitious Materials. *Cem. Concr. Res.* **2011**, *41*, 1244–1256. [CrossRef]
35. Biernacki, J.J.; Bullard, J.W.; Sant, G.; Brown, K.; Glasser, F.P.; Jones, S.; Ley, T.; Livingston, R.; Nicoleau, L.; Olek, J.; et al. Cements in the 21st Century: Challenges, Perspectives, and Opportunities. *J. Am. Ceram. Soc.* **2017**, *100*, 2746–2773. [CrossRef] [PubMed]
36. Possan, E.; Dal Molin, D.C.C.; Andrade, J.J.O. A Conceptual Framework for Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures. *J. Build. Pathol. Rehabil.* **2018**, *3*, 2. [CrossRef]
37. Hafez, H.; Teirelbar, A.; Kurda, R.; Nikola, T.; de la Fuente, A. Pre-Bcc: A Novel Integrated Machine Learning Framework for predicting Mechanical and Durability Properties of Blended Cement. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *352*, 129019. [CrossRef]
38. Dyer, T. *Concrete Durability*, 1st ed.; CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2014; ISBN 978-0-203-86211-7.
39. Ali, S.; Naganathan, S.; Mahalingam, B. State of the Art Review on Prescriptive & Performance Based Approaches for Concrete Durability. *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.* **2021**, *12*, 80–88. [CrossRef]
40. *ASTM C1202*; Test Method for Electrical Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2022.
41. Li, C.; Li, J.; Zheng, Q.; Ren, Q.; Jiang, Z. Durability of Concrete Coupled with Life Cycle Assessment: Review and Perspective. *Cem. Concr. Compos.* **2023**, *139*, 105041. [CrossRef]
42. Huang, Z.; Cao, J.; Yang, Y.; Gong, F.; Zeng, B.; Zhao, Y.; Maekawa, K. Long-Term Deformation and Prestress Loss of PRC Beam under Vari-Humidity Environment: Preliminary Experiments and Multi-Scale Simulations. *Eng. Struct.* **2025**, *322*, 119122. [CrossRef]
43. Perez Villa, M.; Oster, S.; Liu, Y.; Kim Cao, M.; Ganguly, I.; Gregory, J.; Gu, H.; Hasanbeigi, A.; Lu, H.; Miller, S.; et al. *Decarbonizing Concrete Deep Decarbonization Pathways for the Cement and Concrete Cycle in the United*; Industrial Sustainability Analysis Laboratory, Northwestern University: Evanston, IL, USA, 2021.
44. Provis, J.L. Perspectives on Research Directions in Cement and Concrete. *J. Asian Concr. Fed.* **2025**, *11*, 1–13. [CrossRef]

45. Ranasinghe, K.; De Silva, S. Combined Use of Non-Destructive Tests, Visual Inspection and Service Life Prediction to Ensure the Reliability of Reinforced Concrete Water Tanks. *J. Natl. Sci. Found. Sri Lanka* **2022**, *50*, 371–386. [CrossRef]
46. Bras, A.; van der Bergh, J.M.; Mohammed, H.; Nakouti, I. Design Service Life of RC Structures with Self-Healing Behaviour to Increase Infrastructure Carbon Savings. *Materials* **2021**, *14*, 3154. [CrossRef] [PubMed]
47. Andrade, J.J.O.; Possan, E.; Dal Molin, D.C.C. Considerations about the Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures Inserted in Chloride Environments. *J. Build. Pathol. Rehabil.* **2017**, *2*, 6. [CrossRef]
48. Shi, J.; Wang, D.; Ming, J.; Sun, W. Passivation and Pitting Corrosion Behavior of a Novel Alloy Steel (00Cr10MoV) in Simulated Concrete Pore Solution. *J. Mater. Civ. Eng.* **2018**, *30*, 04018232. [CrossRef]
49. Wang, X.-Y. Simulation for Optimal Mixture Design of Low-CO2 High-Volume Ash Concrete Considering Climate Change and CO2 Uptake. *Cem. Concr. Compos.* **2019**, *104*, 103408. [CrossRef]
50. Doussang, L. *Durability of Reinforcement in Low-Carbon Concretes (Low Clinker, Alkali-Activated Slag, Supersulfated Cement)*; Toulouse University: Toulouse, France, 2023.
51. Rathnarajan, S.; Pillai, R.G. Carbonation Models Using Mix-Design Parameters for Concretes with Supplementary Cementitious Materials. *J. Build. Eng.* **2025**, *104*, 112392. [CrossRef]
52. Franke Portella, K.; Pagan Hasparyk, N.; D'Orey Gaivão Portella Bragança, M.; Luís Bronholo, J.; Gomes Dias, B.; Evangelista Lagoeiro, L. Multiple Techniques of Microstructural Characterization of DEF: Case of Study with High Early Strength Portland Cement Composites. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *311*, 125341. [CrossRef]
53. Gu, Y.; Omikrine Metalssi, O.; Martin, R.P.; Fen-Chong, T.; Dangla, P. Locating Ettringite Due to DEF at the Pore Scale of Cement Paste by Heat-Based Dissolution Tests. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *258*, 120000. [CrossRef]
54. Pan, J.W.; Feng, Y.T.; Wang, J.T.; Sun, Q.C.; Zhang, C.H.; Owen, D.R.J. Modeling of Alkali-Silica Reaction in Concrete: A Review. *Front. Struct. Civ. Eng.* **2012**, *6*, 1–18. [CrossRef]
55. Johansson, L.; Bahrami, A.; Wallhagen, M.; Cehlin, M. A Comprehensive Review on Properties of Tailings-Based Low-Carbon Concrete: Mechanical, Environmental, and Toxicological Performances. *Dev. Built Environ.* **2024**, *18*, 100428. [CrossRef]
56. Hasheminezhad, A.; King, D.; Ceylan, H.; Kim, S. Comparative Life Cycle Assessment of Natural and Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Sci. Total Environ.* **2024**, *950*, 175310. [CrossRef] [PubMed]
57. Robalo, K.; Soldado, E.; Costa, H.; Carvalho, L.; do Carmo, R.; Júlio, E. Durability and Time-Dependent Properties of Low-Cement Concrete. *Materials* **2020**, *13*, 3583. [CrossRef] [PubMed]
58. Liang, Q.; Huang, X.; Zhang, L.; Yang, H. A Review on Research Progress of Corrosion Resistance Of-Activated Slag Cement Concrete. *Materials* **2024**, *17*, 5065. [CrossRef] [PubMed]
59. Andrade, C.; Martínez-Serrano, A.; Sanjuán, M.Á.; Tenorio, J.A. Strength and Resistance to Sulfates, Carbonation and Chlorides Ingress by Substitution of Binder by Hydrotalcite in Several Cement Types. *Constr. Mater.* **2023**, *3*, 305–319. [CrossRef]
60. Kasuga, A. Evolution of Fib Model Codes: Mastering Challenges and Encountering New Ones. *Struct. Concr.* **2023**, *24*, 4336–4340. [CrossRef]
61. Possan, E. Between Green and Gray: Decarbonization of Portland Cement and Durability of Concrete—A Critical Review. *Rev. ALCONPAT* **2026**, *16*, 42–59. [CrossRef]
62. Pagani, R.N.; Kovaleski, J.L.; Resende, L.M. Methodi Ordinatio: A Proposed Methodology to Select and Rank Relevant Scientific Papers Encompassing the Impact Factor, Number of Citation, and Year of Publication. *Scientometrics* **2015**, *105*, 2109–2135. [CrossRef]
63. Cheng, Z.; Wang, Z.; Liu, Z.; Li, S. Multiple Impact Dynamic Compression Properties of Lightweight Engineered Composites Containing Ceramsite under Different Initial Damages. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *436*, 136807. [CrossRef]
64. Liu, M.; Liu, H.; Zhu, P.; Chen, C.; Wang, X.; Xu, L. Recycling Potential Evaluation of Geopolymer Concrete with Different System Used in Freeze-Thaw Environment. *Case Stud. Constr. Mater.* **2024**, *21*, e03535. [CrossRef]
65. Wasim, M.; Ngo, T.D.; Law, D. Durability Performance of Reinforced Waste-Based Geopolymer Foam under Exposure to Various Corrosive Environments. *Case Stud. Constr. Mater.* **2021**, *15*, e00703. [CrossRef]
66. Wang, A.; Fang, Y.; Zhou, Y.; Wang, C.; Dong, B.; Chen, C. Green Protective Geopolymer Coatings: Interface Characterization, Modification and Life-Cycle Analysis. *Materials* **2022**, *15*, 3767. [CrossRef] [PubMed]
67. Zunino, F.; Martirena, F.; Scrivener, K. Limestone Calcined Clay Cements (LC3). *Mater. J.* **2021**, *118*, 49–60. [CrossRef]
68. Tsivilis, S.; Batis, G.; Chaniotakis, E.; Grigoriadis, G.; Theodossis, D. Properties and Behavior of Limestone Cement Concrete and Mortar. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 1679–1683. [CrossRef]
69. Tsivilis, S.; Chaniotakis, E.; Kakali, G.; Batis, G. An Analysis of the Properties of Portland Limestone Cements and Concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2002**, *24*, 371–378. [CrossRef]
70. Kim, Y.J.; van Leeuwen, R.; Cho, B.Y.; Sriraman, V.; Torres, A. Evaluation of the Efficiency of Limestone Powder in Concrete and the Effects on the Environment. *Sustainability* **2018**, *10*, 550. [CrossRef]
71. Du, W.; Liu, B.; Zuo, D.; Wu, M.; Li, H.; Ba, M.; Liu, J.; Lin, R.; Liu, Q. Effect of Microcapsules on the Self-Repairing Ability of Limestone Clay Cement (LC3) Mortar at Different Temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *400*, 132718. [CrossRef]

72. Rivera, R.A.; Sanjuan, M.A.; Martin, D.A.; Costafreda, J.L. Performance of Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Coal Fly Ash Portland Cements Exposed to Natural Carbonation. *Materials* **2021**, *14*, 3239. [CrossRef] [PubMed]
73. Wang, X.-Y. Optimal Mix Design of Low-CO2 Blended Concrete with Limestone. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *263*, 121006. [CrossRef]
74. Wang, L.; Zhu, Z.; Ahmed, A.H.; Liebscher, M.; Zhu, X.; Mechtcherine, V. Self-Healing Behavior of High-Strength Strain-Hardening Cement-Based Composites (HS-SHCC) Blended with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Constr. Build. Mater.* **2023**, *370*, 130633. [CrossRef]
75. Ghahsareh, F.M.; Zhang, Q.; Poorghasem, S.; Shah, H.A.; Guo, P.; Christodoulatos, C.; Meng, W.; Bao, Y. Cradle-to-Grave Life-Cycle Assessment of Ultra-High-Performance Concrete(UHPC) Beams Based on Real-Time Monitoring Data. *J. Clean. Prod.* **2025**, *495*, 145098. [CrossRef]
76. Zhang, L.; Bian, M.; Xiao, Z.; Wang, X.; Han, B. A Comprehensive Review of Cementitious Composites Modified with Nano: Fabrication, Microstructures, Properties and Applications. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *409*, 133922. [CrossRef]
77. Xu, J.; Liu, B.; Zhang, Q.; Li, L.; Li, Y.; Lu, L.; Cheng, X. Hydration Characteristics, Structure Evolution of Marine Cement with High Durability Modified by Colloidal Nano-Silica for low Carbon Footprints. *J. Build. Eng.* **2023**, *75*, 106981. [CrossRef]
78. Li, Y.; Liu, Z.; Jiang, J. Microstructure and Macroscopic Properties of Low-Carbon Concrete to Elevated Temperature: State-of-the-Art Review. *J. Build. Eng.* **2024**, *86*, 108731. [CrossRef]
79. Robalo, K.; Costa, H.; do Carmo, R.; Júlio, E. Enhanced Mechanical and Durability Performances of Low Cement Concrete with Natural Pozzolan Addition. *J. Adv. Concr. Technol.* **2021**, *19*, 519–535. [CrossRef]
80. Sirivivatnanon, V.; Xue, C.; Khatri, R. Service-Life Design of Low-Carbon Concrete Containing Fly Ash and Slag under Marine Tidal Conditions. *ACI Mater. J.* **2022**, *119*, 149–164. [CrossRef]
81. Yuan, J.; Li, D.; Li, W.; Yang, H.; Zhang, W.; Wang, L.; Wang, J.; Xiong, Z. Study on Frost Resistance of EPS Concrete Based on EPS Beads Wrapping Modification. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *345*, 128400. [CrossRef]
82. Jin, B.; Wu, S.; Fan, S.; Hang, F.; Chen, H. Strength and Expansion of LHEC with Different Gypsum Contents Under Thermal Curing. *Materials* **2024**, *17*, 5766. [CrossRef] [PubMed]
83. Diao, Z.; Gan, X.; Xu, J.; Jin, Y.; Zhang, H.; Li, L.; Lu, L.; Cheng, X. Enhancement of Mechanical Properties, Durability and Service Life of Low Carbon Cement Paste with Super Low w/c Ratio by Incorporating Carbon Fiber. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *438*, 137035. [CrossRef]
84. Cecen, F.; Aktas, B.; Ozbayrak, A. Decarbonization of the Concrete Railway Sleeper Production: Bringing the Low-Dosage Pozzolanic Cement Usage in the Sleeper Production via Novel Laminated CFRPU Reinforcement Technique. *Mater. Today Sustain.* **2023**, *23*, 100455. [CrossRef]
85. Chen, X.; Zhu, H.; Yang, X.; Huang, C. Development of Anti-Segregation Device and Uniformity Evaluation for all-Bamboo Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *425*, 135974. [CrossRef]
86. Chen, Y.; Wu, Z.; Zeng, C.; Liu, Y.; Pu, S.; Zhang, H.; Feng, Z.; Xu, K.; Ni, D. Study on the Workability, Strength, Durability and Environmental of Alkali-Activated Electrolytic Manganese Slag-Fly Ash-Slag Grouting Materials. *Case Stud. Constr. Mater.* **2025**, *22*, e04199. [CrossRef]
87. Xue, Q.; Zhang, L.; Mei, K.; Wang, L.; Wang, Y.; Li, X.; Cheng, X.; Liu, H. Evolution of Structural and Mechanical Properties of Concrete Exposed to High Concentration CO2. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *343*, 128077. [CrossRef]
88. Shi, W.; Yu, Z.; Kuang, Y. A Probabilistic-Based Durability Analysis of Concrete Structures Exposed to Chloride Containing Environment. *Appl. Mech. Mater.* **2012**, *204–208*, 3282–3286. [CrossRef]
89. Zheng, Z.; Miao, P.; Zheng, L. Bayesian-Based Durability Life Prediction Method of Nano-Modified Concrete. *Int. J. Mater. Product. Technol.* **2023**, *67*, 26–37. [CrossRef]
90. Wang, X.-Y. Optimal Design of Low-Carbon Concrete Containing Fly Ash and Limestone. *Ceram. Silik.* **2022**, *66*, 202–210. [CrossRef]
91. Wang, X. CO2 and Cost-Based Optimum Design of Sustainable Metakaolin-Modified Concrete. *J. Renew. Mater.* **2022**, *10*, 2431–2450. [CrossRef]
92. Wang, X.-Y. Optimization Design of Low-Carbon Hybrid Concrete Containing Slag and Limestone Powder. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2023**, *30*, 10613–10623. [CrossRef] [PubMed]
93. Lin, R.-S.; Han, Y.; Wang, X.-Y. Experimental Study on Optimum Proportioning of Portland Cements, Limestone, Metakaolin, and Fly Ash for Obtaining Quaternary Cementitious. *Case Stud. Constr. Mater.* **2021**, *15*, e00691. [CrossRef]
94. Yang, B.; Dong, Y.; Wang, X.-Y. Analysis of the Strength Development, CO2 Emissions, and Optimized Low-Carbon Design of Fly-Ash-Enhanced Composite Concrete. *Buildings* **2025**, *15*, 532. [CrossRef]
95. DeRousseau, M.A.; Kasprzyk, J.R.; Srubar, W.V., III. Multi-Objective Optimization Methods for Designing Low-Carbon Concrete. *Front. Mater.* **2021**, *8*, 680895. [CrossRef]

96. Chen, L.; Huang, Z.; Pan, W.; Su, R.K.L.; Zhong, Y.; Zhang, Y. Low Carbon Concrete for Prefabricated Modular Construction in Circular Economy: An Integrated Approach towards Sustainability, Durability, Cost, and Mechanical Performances. *J. Build. Eng.* **2024**, *90*, 109368. [CrossRef]
97. Miller, S.A.; Juenger, M.; Kurtis, K.E.; Weiss, J. Cement and Alternatives in the Anthropocene. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2025**, *59*, 309–335. [CrossRef]
98. Watari, T.; Cao, Z.; Hata, S.; Nansai, K. Efficient Use of Cement and Concrete to Reduce Reliance on Supply-Side Technologies for Net-Zero Emissions. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 4158. [CrossRef] [PubMed]
99. UNEP. *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond Foundations: Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings Sector*; UNEP: Nairobi, Kenya, 2024.
100. Rocha, M.S.R.; Caldeira-Pires, A. Environmental Product Declaration Promotion in Brazil: SWOT Analysis and Strategies. *J. Clean. Prod.* **2019**, *235*, 1061–1072. [CrossRef]
101. Hafez, H.; Kurda, R.; Cheung, W.M.; Nagaratnam, B. A Systematic Review of the Discrepancies in Life Cycle Assessments of Green Concrete. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 4803. [CrossRef]
102. Lei, D.; Jia, H.; Yu, L.; Li, Y.; Wu, Z.; Wang, B.; Zhou, A.; Qin, L.; Sun, J.; Wang, W.; et al. Recent Developments in Low-Carbon Engineered Cementitious Composites (ECC). *J. Build. Eng.* **2025**, *100*, 111734. [CrossRef]
103. Müller, H.S.; Haist, M.; Vogel, M. Assessment of the Sustainability Potential of Concrete and Concrete Structures Considering Their Environmental Impact, Performance and Lifetime. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *67*, 321–337. [CrossRef]
104. Wang, X.-Y.; Lee, H.-S. Optimal Mix Design of Air-Entrained Slag Blended Concrete Considering and Sustainability. *Adv. Concr. Constr.* **2021**, *11*, 99–109. [CrossRef]
105. Jiang, Z.; Ozbulut, O.E.; Arce, G.; Colosi, L.M. Accounting for Decarbonization Impacts across the Full Life Cycle of Alternative Concrete Materials: A Case-Study for Graphene-Amended Cementitious Composites. *J. Clean. Prod.* **2024**, *482*, 144186. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

DESENVOLVIMENTO

V. ESTUDO C | CUSTOS DE ABATIMENTO DO CO_2 NO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO

Neste capítulo são calculados os custos de abatimento de CO_2 no CP, para o cenário brasileiro. O método de Custo Marginal de Abatimento (MAC) foi utilizado para estimar o investimento ou lucro associado à implementação das estratégias anteriormente mapeadas (Capítulo III). Os resultados, originalmente expressos em USD/ton CO_2, foram convertidos em USD/ton clínquer e USD/ton agregados, de modo a tornar os valores mais facilmente legíveis e relacionáveis ao principal insumo emissor da cadeia do CP.

Para análise de sensibilidade, foram estabelecidos três cenários: inferior, intermediário e superior, que representam, na mesma ordem, as ações que demandam menor investimento (ou menor lucro) até maior investimento (ou maior lucro). Por fim, a abordagem do mercado de carbono e suas formas de remuneração são relacionadas com a cadeia do CP, o que expõe a fragilidade que há entre remunerar a descarbonização dissociada da durabilidade.

CUSTOS DE ABATIMENTO DO CO_2 NO CIMENTO PORTLAND BRASILEIRO E SUA RELAÇÃO COM O MERCADO DE CARBONO

Juliana Gaio Somer[1]; Edna Possan[2]

[1] Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, julianagaiosomer@gmail.com
[2] Federal University of Latin American Integration (UNILA), Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, epossan@gmail.com

Resumo:

O setor cimenteiro enfrenta o desafio de alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Por isso, conhecer os custos de implementação das estratégias de descarbonização e a relação com o mercado de carbono é essencial para identificar os gargalos associados. Nesta direção, foram avaliados os custos para dez estratégias de descarbonização relacionadas ao fluxo do cimento Portland no Brasil. Foi utilizada a metologia do Custo Marginal de Abatimento (MAC), que relaciona custos e emissões evitadas frente a um cenário base, com resultados em USD/tonelada de CO_2. Para cada estratégia, três cenários (inferior, intermediário e superior) formaram a análise de sensibilidade, combinando fatores técnicos (substituição do clínquer ou de agregados, reatividade do clínquer, eficiência energética, otimização de processos e projetos, uso de combustíveis alternativos, durabilidade, carbonatação natural e CCUS) e econômicos (adaptações nos processos e desenvolvimento de tecnologias). Os dados de entrada do setor produtivo e dos custos foram obtidos de publicações indexadas, setoriais e técnicas disponíveis publicamente, além de dados disponibilizados na internet. Os resultados nivelados para a base clínquer evidenciam que as estratégias com custo de abatimento negativo (lucro), estão em sua maioria em estágio avançado de implementação, como o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) e combustíveis alternativos, com custos de até -15,67 USD e -2,63 USD por tonelada de clínquer, respectivamente. Em contrapartida, a captura, estocagem e utilização de CO_2 (CCUS), que representa até 42% da meta de descarbonização, pode duplicar o preço do clínquer, que pode chegar a 120,93 USD/tonelada, fator limitante de implementação até o momento. Das estratégias voltadas à cadeia da construção, a ação que envolve a concepção e os projetos apresenta um custo de abatimento de 19,50 USD a -2,36 USD por tonelada de clínquer,

Palavras-chave: Curvas MAC; Descarbonização; Baixo carbono; Desempenho; Precificação.

1. INTRODUÇÃO

Para descarbonizar o cimento Portland (CP), agentes setoriais traçaram um conjunto de ações (GCCA, 2025b; IEA; WBCSD; CSI, 2018; SNIC; ABCP, 2019), que englobam ações diretas nas cimenteiras, na produção de concretos e argamassas e na aplicação final do produto, as construções. Entretanto, os relatórios que apresentam o progresso na descarbonização, emitidos pela GCCA (GCCA, 2023, 2025b, 2025a) contêm um teor narrativo e não exatamente de verificação em

cada meta proposta, o que por si só representa um risco ao alcance do carbono neutro em 2050. A Agência Internacional de Energia apontou em seu relatório que em 2025 as emissões totais provenientes da indústria cimenteira estão superiores a 2015, que são necessárias regras claras para a contabilização consistente das emissões e que é necessário um esforço coletivo para alcançar a neutralidade de carbono em 2050 (IEA, 2025).

Compreender o motivo pelo qual algumas estratégias estão em fase mais avançada de implementação do que outras evidencia quais são os principais desafios. Verifica-se que o setor cimenteiro tem implementado com mais celeridade aquelas ações que além do benefício ambiental, apresentam maturidade tecnológica. Especialmente no Brasil, que já possui uma matriz energética predominantemente limpa e o uso do coprocessamento é consolidado (Reis *et al.*, 2023; SNIC; ABCP, 2019), o processo de descarbonatação é o principal emissor de CO_2 (ETC, 2018), responsável por 60% das emissões do cimento (Reis *et al.*, 2023). Por ser inerente à reação de descarbonatação, a redução dessas emissões depende da adoção de métodos para captura, estocagem e uso de carbono (CCUS) ou de menor fator clínquer no cimento.

Essa mesma redução do teor de clínquer é, dentre as ações implantadas no Brasil, a mais verificável, uma vez que o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) é anualmente reportado em um documento setorial, com a evolução da relação clínquer/ cimento (SNIC, 2023, 2024). Esta estratégia, adotada mundialmente, causa modificações físico-químicas e de reatividade do cimento (Aïtcin; Wilson; Mindess, 2018; Bramha Chari; Ranga Rao, 2022; Kipkemboi *et al.*, 2020), que podem causar efeitos indesejados (Beguedou *et al.*, 2023; Dyer, 2014; Mehta; Monteiro, 2006; Natalli *et al.*, 2021). As consequências mais frequentes são a maior necessidade de reparos e o impacto na vida útil da construção, com relação direta com a neutralidade de carbono (Adesina; Zhang, 2024; Ghorbany; Hu, 2025; Papamichael *et al.*, 2023; Possan, 2026). O risco existente é uma construção que requer maiores reparos ou tem ciclo de vida reduzido pode neutralizar as emissões evitadas por meio do cimento de baixo carbono. Além disso, a relação entre o custo do carbono e o ciclo de vida da construção ainda é um assunto que precisa de discussão na literatura (Alyami, 2026), embora seja fundamental para fornecer mecanismos de precificação ao mercado de carbono, ainda não consolidado.

A adoção de tecnologias de CCUS, de acordo com a literatura, pode incrementar o custo do clínquer de 49% a mais de 90% (De Lena *et al.*, 2019; Gardarsdottir *et al.*, 2019). O impacto no preço final do cimento e na real descarbonização é dependente do fator clínquer adotado: quanto menor a relação clínquer/cimento, menor será o impacto de CCUS, tanto em captura de carbono quanto em custo associado. A menor maturidade tecnológica, os requisitos de transporte e armazenamento e as questões normativas já abordadas são motivos que explicam a lenta

implementação nessa rota.

No fluxo do CP, além das estratégias já citadas, há ainda na indústria cimenteira, o aumento da reatividade do clínquer; na produção de concretos e argamassas, a otimização de processos e no consumo de cimento, juntamente com o uso de agregados menos emissivos; e na aplicação final dos materiais, a construção, as principais ações propostas são com relação concepção, projeto e redução de perdas e o aumento da durabilidade das construções. Embora existam metas de descarbonização atreladas a cada uma delas, pouca ou nenhuma medição de resultados concretos é disponível na literatura. Ademais, há dúvidas se a ampla adoção é dependente de custos associados ou pela complexidade do envolvimento das cadeias subsequentes à cimenteira.

Fica evidente que o esforço técnico, regulatório e econômico é encontrar o ponto de equilíbrio entre os benefícios ambientais, o desempenho técnico e a viabilidade financeira, para a obtenção simultânea da neutralidade de carbono e a manutenção do cimento a um preço acessível, especialmente nos países em desenvolvimento (Reis *et al.*, 2023; Scrivener; John; Gartner, 2018). A maturidade das tecnologias de CCUS, juntamente com a precificação do carbono são fatores decisivos no equilíbrio desta equação (Caldas *et al.*, 2024). Enquanto a maturidade tecnológica evolui de forma progressiva, revelada na implementação de projetos de CCUS (GCCA, 2025b), a flutuação no preço do carbono é uma variável crítica para amortizar os investimentos.

Além de flutuante, o preço do carbono é heterogêneo (World Bank, 2026a). Os preços maiores são observados nos mercados regulados, em que o teto de emissões é vinculante e há uma progressiva redução do teto, como no mercado europeu. Nos mercados voluntários ou em fase de amadurecimento, como no Brasil, a ausência de um teto de emissões consolidado tende a resultar em preços menores e menos previsíveis. Essa heterogeneidade afeta diretamente a indústria cimenteira, especialmente as estratégias de descarbonização dependentes do preço do carbono, como é o caso do CCUS. Por demandarem alto investimento, tais ações serão economicamente competitivas apenas se o preço do carbono for elevado e previsível.

Neste contexto, estimar os custos de implementação de cada estratégia voltada à descarbonização do CP é imprescindível para compreender e orientar as ações da cadeia da construção. Uma ferramenta utilizada para avaliar e comparar ações de mitigação é o Custo Marginal de Abatimento (*Marginal Abatement Cost* - MAC), calculado a partir de um conjunto de medidas, com premissas pré-estabelecidas e um cenário base (Farbes; Haley; Jones, 2021; Helmcke *et al.*, 2025; Johnsson; Normann; Svensson, 2020; Rowaihy *et al.*, 2025). Tal metodologia é amplamente utilizada na área de economia ambiental, em estudos de mitigação das emissões para construir curvas que evidenciam o custo e o potencial de abatimento de CO_2 a partir de cada estratégia adotada (Farbes; Haley; Jones, 2021; Johnsson; Normann; Svensson, 2020), com resultados expressos em USD/tCO_2

abatido. Este trabalho tem o objetivo de estimar, por meio de MAC, os custos de abatimento de CO_2 nas estratégias de descarbonização ao longo do fluxo do CP no Brasil.

2. O MERCADO DE CARBONO

A precificação do carbono adotada em vários países segue o princípio do poluidor-pagador, instrumento conhecido como "taxa pigouviana" (Martins de Carvalho; Souza Magalhães, 2022). Seu fundamento é atribuir à emissão um preço equivalente ao custo social que ela provoca, de tal modo que esse custo seja internalizado nas decisões do agente emissor (Stavins, 2019). Conceitualmente, o mecanismo é tido como mais flexível e economicamente eficiente que a imposição regulatória direta, por equilibrar custos e benefícios sociais, de forma que cada agente emissor decida quanto reduzir em função do preço (Martins de Carvalho; Souza Magalhães, 2022; Nordhaus, 2008).

A outra teoria que embasa a precificação do carbono é chamada de "coaseana", que se baseia na atribuição de direitos de propriedade (direito às emissões) com custos negociáveis (Martins de Carvalho; Souza Magalhães, 2022). Nesta linha, a limitação do sistema é um teto às emissões totais, entretanto, cada agenda não possui limite próprio de emissões, desde que sejam adquiridos créditos, com preço definido pelo mercado, para compensação das emissões excedentes (Martins de Carvalho; Souza Magalhães, 2022; Stavins, 2019). A principal semelhança entre as duas teorias está em atribuir ao emissor um custo pelo carbono emitido (internalização), normalmente na etapa inicial da cadeia (Stavins, 2019). A grande distinção entre elas é a variável fixada: enquanto na taxa pigouviana se define o preço e as emissões são ajustadas, na coaseana o teto é fixado pelas emissões, com preço definido pelo mercado (Stavins, 2019; World Bank, 2026b), o que explica a flutuação do preço de carbono. Da segunda abordagem deriva o *Emissions trading systems* (ETS), já bem estabelecido na União Europeia (European Union, 2015; União Europeia, 2023) e crescente na China (Han; Sun; Jiang, 2024; Li; Wang; Qin, 2025), que tem como fundamento precificar a emissão de gases poluentes, limitados por um teto, provenientes dos setores de energia, indústria e aviação (European Union, 2015). A lógica é que o preço do carbono incentive as empresas a reduzirem suas emissões ao menor custo possível.

Qualquer que seja a abordagem de precificação, e seja o mercado voluntário ou regulado, a métrica é sempre estabelecida em USD por tonelada de CO_2 no ponto de emissão, no início da cadeia produtiva, sem qualquer integração com o ciclo de vida da construção que, no caso do cimento, é onde se verifica o desempenho em serviço. A falta dessa conexão gera o risco de que

as reduções contabilizadas nas cimenteiras sejam anuladas pela redução da vida útil. Esse risco pode ser mitigado se a redução das emissões for precificada com base em métricas voltadas ao desempenho e à vida útil. Previamente às possibilidades de precificação do carbono, é preciso dimensionar o custo que ele deve viabilizar. A adoção de CCUS, já apresentada como necessária à neutralidade de carbono (GCCA, 2021; Reis *et al.*, 2023) tem seu custo de implementação diretamente ligado ao mercado de carbono. A captura de carbono tem preço elevado (Caldas *et al.*, 2024), que pode acrescer de 49% a 92% o preço do clínquer (Gardarsdottir *et al.*, 2019; Voldsund *et al.*, 2019), de acordo com a tecnologia adotada. No Brasil este acréscimo pode ser superior à faixa internacional, influenciado pelo uso já predominante de matriz energética renovável e coprocessamento (SNIC; ABCP, 2019), que tornam inferiores as emissões atuais por tonelada de clínquer. Tais valores são altamente dependentes dos custos para implantação e operação da tecnologia de CCUS e, sobretudo, ao valor em que o carbono capturado é comercializado.

O mercado de carbono é flutuante e não possui faixa estabelecida. Só em 2026 os preços entre diferentes ETS variaram de USD 0,72 a USD 99 (World Bank, 2026a). Em 2025, o máximo valor foi de USD 73,90 e em 2015, ano em que foi assinado o Acordo de Paris, USD 37,50 por tonelada de CO_2 (World Bank, 2026a). Já, as taxas de carbono, que são instrumentos de preço fixo, em 2026, alcançaram USD 169,70 (World Bank, 2026a). Esses valores ilustram a falta de previsibilidade financeira que impacta sobre a produção do clínquer e do cimento (Chen; Wu; Han, 2025). Além disso, o valor mínimo para manter o aquecimento global abaixo de 2ºC é estimado em USD 60,00 e apenas 3% das emissões globais são cobertas por tal valor (Macintosh *et al.*, 2025). Neste contexto, mecanismos como preço-piso e contratos por diferença (CCfD – *Carbon Contracts for Difference*) podem conferir uma certa previsibilidade ao preço, muito embora isso não corrige a causa raiz do problema: reduzir as emissões nas cimenteiras não significa, por si só, garantir a durabilidade das construções.

3. METODOLOGIA

Para os cálculos da estimativa de abatimento de CO_2 nas estratégias de descarbonização ao longo do fluxo do CP foi adotado o método denominado Custo Marginal de Abatimento (MAC) (Helmcke *et al.*, 2025; Johnsson; Normann; Svensson, 2020; Kesicki; Ekins, 2012). Esta metodologia avalia e compara o custo para reduzir emissões de gases poluentes com várias estratégias, em uma mesma base econômica. Para tanto, é calculada a razão entre o valor presente do custo líquido de uma ação de mitigação, que considera os custos menos benefícios

econômicos diretos, em relação a um cenário base, e a quantidade de emissões evitadas por essa ação. A estrutura básica do cálculo dos custos de abatimento é baseada na Equação 1. Sua expressão é dada em USD/tonelada de CO_2.

$$MAC = \frac{Custo\ das\ ações\ para\ abatimento - Custo\ atual\ para\ produção}{Emissões\ CO_2\ atuais - Emissões\ CO_2\ previstas} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

MAC: Custo Marginal de Abatimento (*Marginal Abatement Cost*);

Custo das ações para abatimento: Custo estimado para implantação e/ou operação das ações que visem reduzir emissões, obtidos a partir das premissas estabelecidas na análise;

Custo atual para produção: Custo atual de produção, obtidos da literatura, documentos técnicos e setoriais;

Emissões CO_2 atuais: CO_2 emitido atualmente, com os processos em uso, obtidos da literatura, documentos técnicos e setoriais;

Emissões CO_2 previstas: Emissões de CO_2 previstas, com as mudanças implantadas, obtidos a partir das premissas estabelecidas na análise.

Nos resultados, a convenção de sinais é que custos positivos representam uma despesa, enquanto os custos negativos representam lucro associado àquela ação. No numerador das equações estão detalhados os custos para produção e/ou aplicação das ações de descarbonização propostas, expressas em dólares americanos, e no denominador, as emissões - atuais e as previstas, em toneladas de CO_2. As etapas que compõem a metodologia para o cálculo dos custos de abatimento das emissões estão resumidas na Figura 1.



Figura 1: Etapas metodológicas da estimativa de custos do abatimento de CO2 no CP para o cenário brasileiro.

Na sequência, as etapas acima descritas são apresentadas de forma detalhada.

3.1. DEFINIÇÃO DO ESCOPO E ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para o desenvolvimento dos cálculos, a primeira etapa consistiu na definição do escopo de trabalho, que consiste em estimar os custos de abatimento do CO_2 no fluxo do CP brasileiro. As emissões associadas ao CP são majoritariamente do CO_2, logo, este é o enfoque das estimativas. A abordagem metodológica utilizada foi baseada em especialistas (*expert-based*), na qual os dados de entrada são definidos a partir do julgamento, do conhecimento técnico e da experiência de conhecedores do assunto. Dentre as limitações da metodologia, merecem destaque os custos e/ou preços de entrada assumidos e o cenário base de emissões.

3.2. MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS AÇÕES DE DESCARBONIZAÇÃO

Foram mapeadas, qualitativamente e quantitativamente na literatura, as principais estratégias da indústria cimenteira que visam a neutralidade de carbono: i) substituição do clínquer por MCS; ii) aumento da reatividade do clínquer; iii) eficiência energética; iv) combustíveis alternativos; v) otimização de processos e consumo de cimento; vi) concepção, projeto e redução de perdas; vii) aumento da durabilidade; viii) carbonatação natural; ix) agregados menos emissivos e x) CCUS. Embora este trabalho esteja voltado aos custos da descarbonização do CP no Brasil, o escopo incluiu estratégias consideradas no mercado global, de forma a avaliar sua aplicabilidade e seus efeitos no mercado brasileiro.

3.3. DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

A aplicação das ações que visam a redução das emissões pode ser muito variável. Como exemplo, na estratégia do uso de combustíveis alternativos, o percentual de substituição do combustível atual e o custo com o novo combustível podem variar em uma faixa muito ampla. Neste contexto, optou-se por trabalhar com a análise de sensibilidade em cada ação, em três cenários: inferior (conservador), intermediário (moderado) e superior (audacioso). Tais cenários não são etapas sequenciais, mas variações possíveis dentro do mesmo cálculo, os quais consideram uma combinação de possibilidades técnicas, econômicas e normativas. Dentro dos cenários, algumas premissas foram fixadas, como por exemplo, o custo para adaptação do processo.

3.4. LEVANTAMENTO DE DADOS PRODUTIVOS

Os dados do setor produtivo, tais como consumo energético e custos operacionais, foram obtidos de publicações indexadas, setoriais e técnicas disponíveis publicamente. Os custos com adaptações do processo de produção, aquisição de equipamentos e desenvolvimento tecnológico foram obtidos de publicações indexadas, setoriais e técnicas disponíveis publicamente, além de dados disponibilizados na internet. Sempre que disponíveis, foram utilizados dados do mercado brasileiro, e quando não localizados, foram utilizadas referências internacionais. Os valores e utilizados e suas fontes estão no Material Suplementar, Tabelas 1S e 2S (Apêndice B). Os valores obtidos em reais ou euros foram convertidos para dólares americanos, com cotações em julho de 2026, do Banco Central do Brasil. Para cálculos futuros, os valores aqui adotados poderão ser adaptados conforme a necessidade do trabalho e a disponibilidade de informações no momento do cálculo.

3.5. EMISSÕES DE CO_2

Os dados das emissões atuais foram obtidos de publicações indexadas, setoriais e técnicas disponíveis publicamente. Sempre que disponíveis, foram utilizados dados do mercado brasileiro, e quando não localizados, foram utilizadas referências internacionais. Os valores e utilizados e suas fontes estão no Material Suplementar, Tabelas 1S e 2S (Apêndice B). Os valores obtidos em reais ou euros foram convertidos para dólares americanos, com cotações em julho de 2026, do Banco Central do Brasil. As emissões estimadas foram calculadas a partir das entradas de ações que serão realizadas para descarbonizar. Por exemplo, as ações que visam a economia de clínquer, a redução das emissões foi baseada na quantidade de clínquer que deixará de ser utilizado. Para cálculos futuros, os valores aqui adotados poderão ser adaptados conforme a necessidade do trabalho e a disponibilidade de informações no momento do cálculo.

3.6. ESTIMATIVA DOS CUSTOS DE ABATIMENTO DE CO_2

Nesta etapa, os custos de abatimento de CO_2 foram estimados, para cada uma das estratégias mapeadas anteriormente. O detalhamento dos cálculos aplicados para cada ação e as premissas dos cenários são apresentados na sequência.

3.6.1. Substituição do clínquer por MCS

Nesta estratégia, o cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 2 e apresentadas na Tabela 1.

$$MAC_{MCS} = \frac{(MCS + Processamento\ do\ MCS + Adaptação\ do\ processo) - Clínquer}{Fator\ de\ emissão\ do\ clínquer - Fator\ de\ emissão\ do\ MCS} \qquad \text{(Equação 2)}$$

Tabela 1: Detalhamento dos itens que compõem a equação de MAC_{MCS}

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
MCS (custo com aquisição e transporte)	USD/ t de MCS	$45,93	$10,10	$2,00
Adaptação do processo (custos com processamento adicional, quando aplicáveis - moagem, calcinação)	USD/ t de MCS	$1,93	$5,86	$1,38
Custo da adaptação de processo/ formulação	USD/ t de MCS	$2,99	$2,99	$2,99
Custo do clínquer	USD/ t de clínquer	$52,45	$52,45	$52,45
Fator de emissão do clínquer	tCO_2/ t de clínquer	0,89	0,89	0,89
Fator de emissão do MCS (processamento)	tCO_2/ t de clínquer	0,00	0,30	0,00
Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	**-$1,81**	**-$56,47**	**-$51,78**

O cenário inferior considera o uso de escória, o cenário intermediário foi delineado com argila e o superior, com fíller disponível na cimenteira. Na adaptação do processo, foi considerado um *retrofit* da planta, diluído em 10 anos sobre, a partir da produção de clínquer brasileira em 2025 (40,2 Mt). Os processamentos adicionais foram aplicados conforme a necessidade de cada material. No cenário base os MCS foram considerados com zero emissão.

3.6.2. Aumento da reatividade do clínquer

O cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 3. Na adaptação do processo, foi considerado um *retrofit* da planta, diluído em 10 anos sobre, a partir da produção de clínquer brasileira em 2025 (40,2 Mt). O custo de moagem adicional considerado foi em 30%; as economias com clínquer foram estimadas a partir da literatura, enquanto o denominador representa o clínquer evitado pela maior reatividade, conforme apresentado na Tabela 2.

$$MAC_{Reatividade} = \frac{(Moagem\ adicional + Adaptação\ do\ processo) - Economia\ com\ Clínquer}{Fator\ de\ emissão\ do\ clínquer\ evitado} \quad \text{(Equação 3)}$$

Tabela 2: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{REATIVIDADE}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Moagem adicional	USD/ t clínquer	$0,58	$0,58	$0,58
Adaptação de processo	USD/ t clínquer	$1,49	$1,49	$1,49
Economia de clínquer no cimento	%	3%	5%	10%
Custo do clínquer	USD/ t de clínquer	$52,45	$52,45	$52,45
Emissão evitada	tCO_2/ t de clínquer	0,03	0,04	0,09
Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	**$18,60**	**-$12,36**	**-$35,68**

3.6.3. Eficiência energética

O cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 4 e apresentadas na Tabela 3. Na adaptação do processo, foi considerado um *retrofit* da planta, diluído em 10 anos sobre, a partir da produção de clínquer brasileira em 2025 (40,2 Mt). O consumo energético específico adotado foi de 60kWh/ tonelada clínquer; o fator evitado do coque de petróleo foi de 0,0975 tCO_2/GJ e o fator evitado na rede elétrica de 0,0545 tCO_2/MWh.

$$MAC_{Eficiência\ energética} = \frac{(Custo\ energético + Adaptação\ do\ processo)}{Fator\ de\ emissões\ evitadas} \quad \text{(Equação 4)}$$

Tabela 3: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{EFICIÊNCIA\ ENERGÉTICA}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Redução de energia térmica	%	2,50%	5%	10%
Redução de energia elétrica	%	2,50%	3%	5%
Retrofit médio da planta (eficiência equipamentos e eletrificação)	USD/ t clínquer	$0,05	$0,07	$0,11
Retrofit da planta (eletrificação)	USD/ t clínquer	$0,17	$0,20	$0,26
Economia de energia (combustível e eletricidade)	USD/ t clínquer	$0,29	$0,53	$1,03
Emissão evitada	tCO_2/ t de clínquer	0,0086	0,0171	0,0341
Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	**-$8,97**	**-$15,50**	**-$19,53**

As premissas assumidas para o cenário inferior foram redução de 2,5% no consumo de energia térmica e elétrica; intermediário com redução de 5% da energia térmica e 3% da elétrica e superior com redução de 10% na energia térmica e 5% na elétrica.

3.6.4. Uso de combustíveis alternativos

Nesta estratégia, o cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 5. O cenário base é com uso de 32% de resíduos alternativos, o que representa atualmente o mercado brasileiro. O valor assumido por tonelada de combustível alternativo, tanto para aquisição como para destinação (*gate fee*) foi de R$ 200,00. Para os combustíveis alternativos, considerados resíduos de outras indústrias, as emissões foram consideradas nulas, por assumir que o produtor do resíduo responde por tais emissões, conforme dados da Tabela 4.

$$MAC_{Combustível} = \frac{(Novo\ combusível + Adaptação\ do\ processo) - Economia\ com\ combustível\ atual}{Fator\ de\ emissão\ evitado\ pelo\ novo\ combustível} \quad \text{(Equação 5)}$$

Tabela 4: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{COMBUSTÍVEL}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Valor com combustível alternativo (receita ou despesa)	USD/ t clínquer	$4,13	$0,00	-$1,76
Custo com combustível	USD/ t clínquer	$8,96	$8,96	$8,96
Adaptação de processo	USD/ t clínquer	$2,00	$2,00	$2,00
Fator de emissão evitada dos combustíveis	tCO_2/ t de clínquer	0,254	0,170	0,109
Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	**-$2,34**	**-$14,63**	**-$24,21**

O cenário inferior considera o custo do combustível e até 75% de substituição do coque de petróleo, o intermediário considera custo zero para o combustível e substituição de 50%, enquanto no cenário superior há gate fee pelo processamento do combustível alternativo e substituição de 32%. Na adaptação do processo, foi considerado um retrofit da planta, diluído em 10 anos sobre, a partir da produção de clínquer brasileira em 2025 (40,2 Mt). O fator de emissão assumido para o coque de petróleo foi 97,5 tCO2/TJ.

3.6.5. Otimização de processos e consumo de cimento

O cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 6. O cenário base considera o consumo de 0,28 toneladas de cimento por m^3 de concreto, conforme estabelece a NBR 12655:2022. O custo incremental na formulação do cimento foi fixado em 15%, conforme apresentado na Tabela 5.

$$MAC_{Consumo} = \frac{(Custo\ incremental\ na\ formulação\ do\ cimento - Economia\ no\ consumo)}{Fator\ de\ emissão\ evitado\ pela\ redução\ no\ consumo} \quad \text{(Equação 6)}$$

Tabela 5: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{CONSUMO}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Custo incremental na formulação do cimento	USD/ m³ de concreto	$3,67	$3,67	$3,67
Custo do clínquer	USD/ t de clínquer	$52,45	$52,45	$52,45
Economia por menor consumo de cimento/ m³	USD/ m³ de concreto	$2,45	$3,67	$6,12
Fator de emissão evitada	tCO_2/ m³ de concreto	0,015	0,022	0,037
Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitada	**$81,86**	**$0,00**	**-$65,49**

Os cenários foram estimados com redução no consumo de cimento em: inferior 10%; intermediário 15% e superior 25%, conforme projetado no roadmap brasileiro (SNIC; ABCP, 2019).

3.6.6. Concepção, projeto e redução de perdas

Para esta estratégia, o cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 7. O cenário base considera o consumo de 0,28 toneladas de cimento por m^3 de concreto, conforme estabelece a NBR 12655:2022. Os cenários foram estimados com redução no consumo de cimento em: inferior 10%; intermediário 15% e superior 25%, conforme projetado no roadmap brasileiro (SNIC; ABCP, 2019) e apresentado na Tabela 6.

$$MAC_{Projeto} = \frac{Projetos\ otimizados - Economia\ no\ consumo\ de\ concreto}{Fator\ de\ emissão\ evitado\ pela\ redução\ no\ consumo} \quad \text{(Equação 7)}$$

Tabela 6: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{PROJETO}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Projeto otimizado	USD/ m² de área construída	$1,72	$1,72	$1,72
Economia por menor consumo de cimento	USD/ m² de área construída	$0,73	$1,10	$1,84
Redução no consumo de cimento / m² construído	tCO_2/ m² construído	0,0045	0,0067	0,0112
Custo de abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	**$219,06**	**$91,47**	**-$10,60**

O valor base para projetos foi estimado a partir do Custo Unitário Básico da Construção (CUB), para o estado de São Paulo, no mês de julho de 2026. As premissas adotadas são que 2% do valor do CUB representa o custo com projeto de alvenaria e sobre este valor, um acréscimo de 20% pela elaboração de projetos otimizados.

3.6.7. Aumento da durabilidade

O cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 8. O cenário base considera o consumo de 0,28 toneladas de cimento por m^3 de concreto, conforme apresentado na Tabela 7.

$$MAC_{Durabilidade} = \frac{Reparos\ necessários - Reposição\ evitada}{Fator\ de\ emissão\ evitado} \quad \text{(Equação 8)}$$

Tabela 7: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{DURABILIDADE}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Custo incremental do concreto durável	USD / m³ de concreto	$2,45	$3,67	$4,90
Economia por reposição evitada	USD / m³ de concreto	$2,45	$4,90	$9,79
Emissão evitada (reposição não realizada)	tCO_2 / m³ de concreto	0,0150	0,0299	0,0598
Aumento de durabilidade (nova fração evitada)	%	10%	20%	40%
Custo de abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	**$0,00**	**-$40,93**	**-$81,86**

A durabilidade das construções tem como cenário base 50 anos e as projeções foram arbitradas para incremento em 10%, 20% e 40% de vida útil, o que representa: cenário inferior – 55 anos; intermediário – 60 anos e superior – 70 anos.

3.6.8. Carbonatação natural

Nesta estratégia não existem custos associados à captura de carbono, por se tratar de uma reação química que acontece naturalmente nos materiais à base de cimento expostos ao ar ambiente. Assim, há um ativo de potencial abatimento das emissões do processo de produção do cimento, considerando que esse crédito seja destinado integralmente à indústria cimenteira. A Equação 9 e a Tabela 8 mostram este cenário.

$$MAC_{Carbonatação} = Receita\ com\ CO_2 \qquad \text{(Equação 9)}$$

Tabela 8: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{CARBONATAÇÃO}$

Termo	**Unidade**	**Cenários**		
		Inferior	Intermediário	Superior
Custo incremental direto	USD / tCO_2 absorvida	$0,00	$0,00	$0,00
Receita / crédito de carbono contabilizado	USD / tCO_2 absorvida	$30,00	$30,00	$30,00
Custo de abatimento líquido	USD / tCO_2 absorvida	**-$30,00**	**-$30,00**	**-$30,00**

O preço do CO_2 foi fixado em USD 30,00/ tonelada, para os cenários inferior, intermediário e superior e pode representar uma receita direta às cimenteiras.

3.6.9. Agregados menos emissivos

O cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das informações resumidas na Equação 10. Os cenários foram estimados com substituição dos agregados virgens em: inferior 5%; intermediário 10% e superior 30% (Tabela 8).

$$MAC_{Agregados} = \frac{Custo\ agregado\ reciclado - Custo\ agregado\ virgem}{Fator\ de\ emissão\ agregado\ virgem - Fator\ de\ emissão\ mix\ agregados} \qquad \text{(Equação 10)}$$

Tabela 9: Detalhamento dos itens que compõem a equação de $MAC_{AGREGADOS}$

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Preço do agregado graúdo natural substituído	USD/ t de agregado	$15,81	$15,81	$15,81
Fator de substituição por agregado reciclado	%	5%	10%	30%
Custo do agregado misto (natural + reciclado)	USD/ t de agregado	$15,61	$15,42	$14,62
Fator de emissão do agregado natural	tCO_2/ t de agregado	0,0028	0,0028	0,0028
Fator de emissão do agregado reciclado	tCO_2/ t de agregado	0,0008	0,0008	0,0008
Fator de emissão do agregado substituído	tCO_2/ t de agregado	0,0027	0,0026	0,0022
Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	**-$1.910,28**	**-$1.910,28**	**-$1.910,28**

O custo do mix de agregados foi assumido como 25% inferior ao uso de agregados naturais. A plataforma SIDAC - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção foi utilizada para obtenção dos fatores de emissão.

3.6.10. CCUS

O cálculo de abatimento de CO_2 foi estimado a partir das diferentes tecnologias disponíveis no mercado atualmente e seu estado da arte: inferior – monoetanolamina (MEA); intermediário – *Calcium Looping* e superior – *Oxyfuel*, ordenadas em função do custo de implantação. conforme detalhado na Equação 11 e na Tabela 10.

$$MAC_{CCUS} = Captura + Transporte + Estocagem \qquad \text{(Equação 11)}$$

Tabela 10: Detalhamento dos itens que compõem a equação de MAC_{CCUS}

Termo	Unidade	Cenários		
		Inferior	Intermediário	Superior
Captura no forno (CAPEX, OPEX)	USD/ tCO_2 evitado	$82,00	$55,00	$42,00
Transporte de CO_2 (tubulação)	USD/ tCO_2	$10,00	$10,00	$10,00
Estocagem geológica	USD/ tCO_2	$15,00	$15,00	$15,00
Fator de emissão do clínquer	tCO_2/ t de clínquer	0,89	0,89	0,89
Taxa de CO_2 evitado	%	64%	73%	82%
CO_2 evitado por tonelada de clínquer	tCO_2/ t de clínquer	0,57	0,65	0,73
Custo do abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	**$107,00**	**$80,00**	**$67,00**

Com a tecnologia MEA, a eficiência na captura de CO_2 é de 64%; com a *Calcium Looping*, 73% e chega a 82% com uso de *Oxyfuel*. As premissas assumidas são de transporte via tubulação e armazenamento geológico, para todas as tecnologias, das quais os custos são adicionais à captura.

3.7. NIVELAMENTO DOS RESULTADOS

Concluída a etapa custos de abatimento de CO_2, os resultados originados foram nivelados para a base clínquer (USD/t clínquer), exceto a estratégia de agregados, que foi apresentada em USD/t agregado, para tornar os resultados mais facilmente relacionáveis ao clínquer, que é o principal emissor da cadeia do CP. As premissas utilizadas para conversão em base clínquer são apresentadas na Tabela 3 11.

Tabela 31: Premissas para conversão em base clínquer

Requisito	Unidade	Valor	Fonte
Relação clínquer/cimento	t clínquer/t cimento	0,60	SNIC, 2025
Fator de emissão total do clínquer	tCO_2/t clínquer	0,89	SNIC, 2025
Fator de emissão da calcinação do clínquer	tCO_2/t clínquer	0,53	GCCA, 2025
Consumo de cimento/ m^3 de concreto (médio)	t cimento/m^3 concreto	0,28	NBR 12655: 2022
Volume de concreto/ m^2 construído	m^3 concreto/m^2 construído	0,30	
Consumo de clínquer/ m^2 construído	t clínquer/m^2 construído	0,050	

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

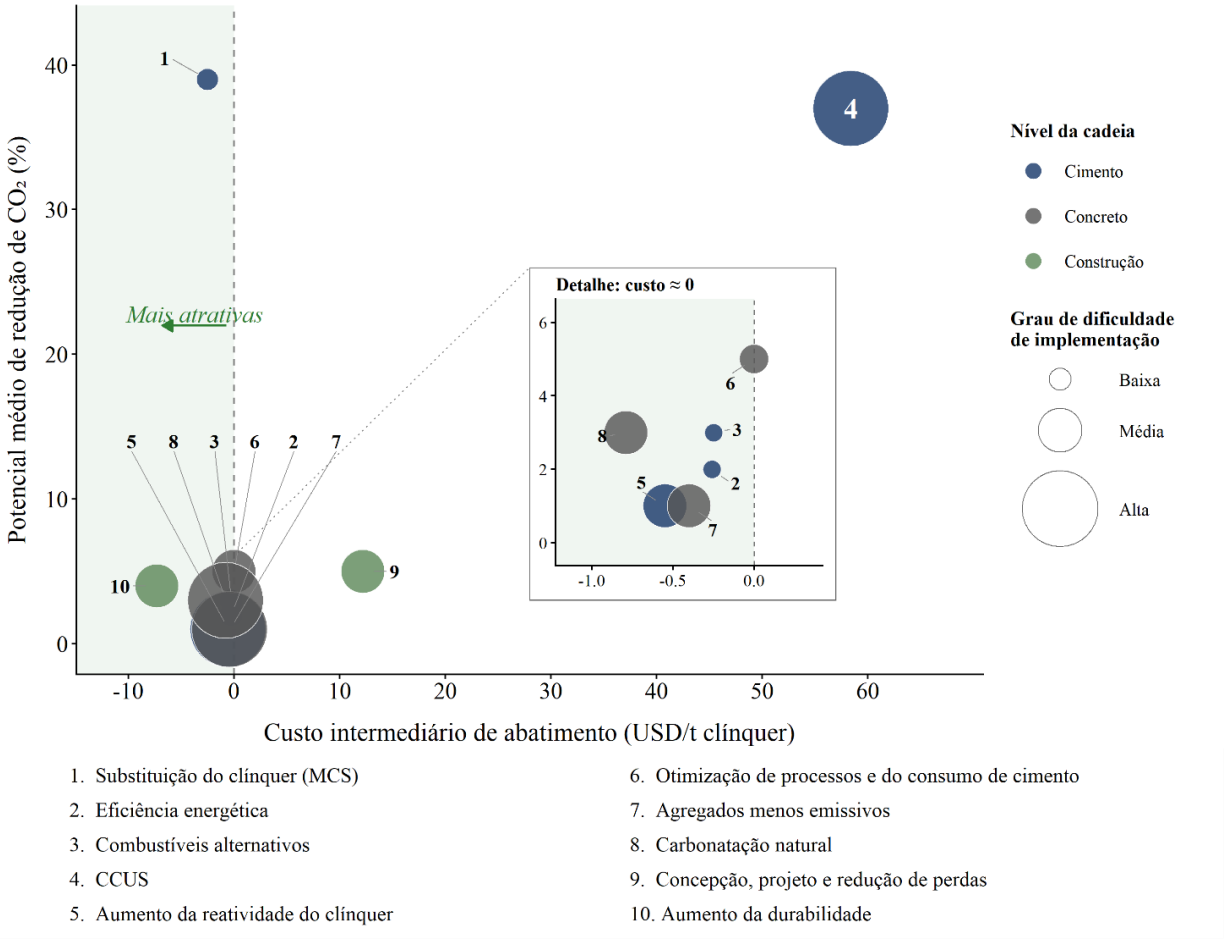
Para demonstrar a relação entre o potencial de descarbonização por cada meta estabelecida globalmente, foram calculados os custos de abatimento de CO_2, quando aplicados no cenário brasileiro. Os cenários inferior (conservador), intermediário (moderado) e superior (audacioso) representam a análise de sensibilidade, que consideram uma combinação de possibilidades técnicas, econômicas e normativas, quando aplicáveis. Os resultados obtidos em cada cenário estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 12: Resultados obtidos em cenário e nivelados em base clínquer e agregados

Estratégia		Unidade	Cenários		
			Inferior	Intermediário	Superior
A1. Substituição do clínquer por MCS	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	-$1,81	-$56,47	-$51,78
	Nível de substituição	%	75%	5%	34%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,6675	0,0445	0,3026
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	-$1,20	-$2,51	-$15,67
A2. Aumento da reatividade do clínquer	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	$18,60	-$12,36	-$35,68
	Economia de clínquer	%	3%	5%	10%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,0267	0,0445	0,089
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	$0,50	-$0,55	-$3,18
A3. Eficiência energética	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	-$8,97	-$15,50	-$19,53
	Ganho energético	%	2,5%	5%	10%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,009	0,017	0,034
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	-$0,08	-$0,26	-$0,67
A4. Combustíveis alternativos	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	-$2,34	-$14,63	-$24,21
	Possibilidade substituição	%	75,0%	50%	32%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,254	0,170	0,109
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	-$0,60	-$2,48	-$2,63
A5. Otimização de processos e consumo de cimento	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	$81,86	$0,00	-$65,49
	Economia de cimento	%	10,0%	15%	25%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,089	0,134	0,223
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	$7,29	$0,00	-$14,57
A6. Concepção, projeto e redução de perdas	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	$219,06	$91,47	-$10,60
	Economia de cimento	%	10,0%	15%	25%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,089	0,134	0,223
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	$19,50	$12,21	-$2,36
A7. Aumento da durabilidade	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	$0,00	-$40,93	-$81,86
	Vida útil	Anos	55	60	70
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,089	0,178	0,356
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	$0,00	-$7,29	-$29,14
B1. Carbonatação natural	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	-$30,00	-$30,00	-$30,00
	Recarbonatação	%	0%	5%	15%
	Emissão	tCO_2/ t clínquer	0,000	0,026	0,079
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	$0,00	-$0,79	-$2,36
B2. Agregados menos emissivos	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	-$1.910,28	-$1.910,28	-$1.910,28
	Nível de substituição	%	5%	10%	30%
	Emissão evitada	tCO_2/ t agregado	0,000	0,000	0,001
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t agregado	-$0,20	-$0,40	-$1,19
C1. CCUS	Custo do abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	$107,00	$80,00	$67,00
	Acréscimo ao custo do clínquer	USD	$54,55	$27,55	$14,55
	Acréscimo ao custo do clínquer	%	104%	53%	28%
	Emissão evitada	tCO_2/ t clínquer	0,570	0,650	0,730
	Custo (+)/ ganho (-) líquido	USD/ t clínquer	$68,48	$58,40	$54,94

Por exemplo, não há limitações em relação ao uso de combustível nos fornos de clinquerização. Contudo, o clínquer obtido deve atender determinadas especificações por norma. Logo, independente do combustível utilizado, o requisito é a qualidade do clínquer. No caso do uso de MCS como substituintes de parcela do clínquer, a legislação brasileira (ABNT NBR 16.697:2018) estabelece limites máximos de substituição, conforme o tipo de cimento. Em cada cenário foi utilizado um tipo de MCS e sua substituição normativa máxima, sem considerar fatores como a disponibilidade daquele material para a volume de cimento consumido no país. Este é um desafio associado aos MCS, já que os materiais com uso já consolidado, como as cinzas volantes, são limitados.

Para avaliar os resultados da Tabela 2 relacionados com sua implementação, os valores intermediários para o mercado brasileiro estão apresentados na Figura 2. As estratégias foram estratificadas por cadeia (cimento, concreto, construção) e estão separados por cores. O grau de dificuldade para implementação foi identificado pelo tamanho dos círculos.



*Estratégia 7 expressa em USD/ t agregados.

Figura 2: Potencial de redução de CO_2 em função do grau de dificuldade para implementação das estratégias mapeadas e da estimativa de custo para implementação.

Fonte: Adaptado de GCCA, 2021; IEA, 2023; SNIC; ABCP, 2019 e cálculos da autora.

A estratégia de redução do uso do clínquer, a de maior contribuição na descarbonização do mercado brasileiro, tem custos negativos de abatimento, ou seja, representa economia às cimenteiras. As economias chegam a -56,47 USD por tonelada de CO_2 abatida, que representa até -15,67 USD por tonelada de clínquer, em função do tipo de MCS e percentual de substituição no cimento (Tabela 2). Essa faixa é condizente com os resultados encontrados na Índia, que tem abatimento negativo que chega a -20,00 USD por tonelada de CO_2 evitada (NITI Aayog, 2026) e diverge de valores estimados na Suíça (Nakhle; Eckle; Krüger, 2022), onde a estratégia resulta em aumento no custo do cimento, uma vez que os MCS têm custo de até 50% em relação ao valor do clínquer.

As tecnologias de CCUS têm alta dificuldade de implementação e custos intermediários de 58,40 USD, para cada tonelada de clínquer. Esse valor é condizente com a literatura, que relata que os custos do clínquer podem ser incrementados de 49% a 92% (De Lena *et al.*, 2019; Gardarsdottir *et al.*, 2019; NITI Aayog, 2026; Voldsund *et al.*, 2019), em função da tecnologia adotada. O impacto no preço final está atrelado à relação clínquer-cimento adotada em cada país e, evidentemente, o preço do carbono capturado.

A carbonatação natural tem “custo zero” associado, pois ocorre espontaneamente a partir do contato dos materiais cimentícios com o ar atmosférico, mas pode gerar receitas de até 2,36 USD por tonelada de clínquer, valor este que pode ser ainda maior em função do preço do carbono. As metas de eficiência energética, uso de combustíveis alternativos e aumento da reatividade do clínquer possuem custos de abatimento negativos, de -0,26 USD; -2,48 USD e -0,55 USD respectivamente, por tonelada de clínquer, o que justifica sua adoção primária pelas indústrias e contribuição praticamente esgotada na descarbonização do cimento brasileiro (Reis *et al.*, 2023).

Na produção dos materiais cimentícios, a otimização do consumo do cimento, na sua faixa intermediária, tem custo zero, enquanto o uso de agregados menos emissivos pode responder por uma economia de até 0,40 USD por tonelada de agregado. Este último tem a limitação da quantidade de material disponível para substituição, a qual é estimada em apenas 10% da demanda existente (Paz *et al.*, 2023). Contudo, são ações externas às cimenteiras e dependem de um maior número de agentes para implementação.

Das estratégias voltadas à cadeia da construção, a ação que envolve a concepção e os projetos apresenta um custo de abatimento de 12,21 USD por tonelada de clínquer, entretanto, pode chegar a um custo negativo de até -2,36 USD, caso a economia de cimento chega a 25%, conforme indicador apresentado no Roadmap brasileiro (SNIC; ABCP, 2019). O aumento da durabilidade das estruturas em 10 anos, que representa 20% acima do mínimo previsto na norma brasileira (ABNT, 2025), pode representar um abatimento negativo de até -7,29 USD por tonelada de

clínquer. Embora a questão da durabilidade de uma construção envolva vários fatores, observar essa possibilidade pode ser um fator motivador na busca de sua implementação. Entretanto, ambas as estratégias estão concentradas no fim da cadeia do cimento, demandam qualificação dos intervenientes em materiais e processos construtivos de baixo carbono, o que torna mais complexo fazer tais implementações.

Nenhuma das ações apresentadas considera seu impacto ao longo da cadeia de utilização do CP, o que cria uma fragilidade acerca da real contribuição na descarbonização. Considerar fatores associados ao tempo de serviço pode ser uma ferramenta útil neste processo e constitui a relação direta com o mercado de carbono. A grande maioria das métricas das emissões e suas precificações são realizadas na cimenteira, ou seja, quanto CO_2 foi evitado para produzir uma tonelada de cimento. Contudo, a neutralidade real de uma construção passa por todas as etapas do fluxo do CP e se estende ao longo do ciclo de vida (Possan, 2026; Possan; Dal Molin; Andrade, 2018), o que inclui as emissões provenientes de reparos. O paradoxo que se estabelece é medir pontualmente algo que tem efeito diluído ao longo do tempo. Essa constatação pode ser feita ao comparar a utilização de dois cimentos com emissões similares na fabricação: uma construção pode ter a durabilidade de 50 anos, enquanto a outra carece de grandes reparos aos 30 anos, ou seja, as emissões de partida podem se alterar completamente ao longo do fluxo do CP (Ghorbany; Hu, 2025). Os resultados expressos na Tabela 2, quanto à estratégia do aumento da durabilidade, ratificam este estudo. Somado a isso, a durabilidade de cimentos menos emissivos nem sempre pode ser garantida. Este é o ponto cego da estrutura do mercado de carbono: as toneladas de CO_2 têm o mesmo preço, embora não representem o mesmo ganho ambiental. Corrigir essa falha exige métricas de precificação que abarquem o ciclo de vida das construções, e não apenas as emissões no cimento.

Dentre as possibilidades de contabilização que consideram outros fatores além do abatimento, já exploradas na literatura, estão tCO_2/ m^2 construído, por módulo do ciclo de vida (OECD, 2025); tCO_2/ m^2/ano (Zhang; Puaan, 2026) e tCO_2/ m^2 durante um período determinado (Huang *et al.*, 2024), que têm a similaridade de superar a medição das emissões apenas no cimento. No entanto, apesar de essas métricas distribuírem as emissões ao longo do tempo, a durabilidade não é precificada. A contabilização via $tCO_2/ m^{3/}$ MPa (Damineli *et al.*, 2010) incorpora o desempenho mecânico, enquanto métodos que correlacionam impacto ambiental, custo e vida útil (Kim *et al.*, 2016) evidenciam que a durabilidade cresce com a resistência. Nenhuma dessas métricas avança até a fronteira da precificação do carbono, o que será aqui proposto.

O índice de intensidade de carbono pode ser estendido com uma variável temporal, de tal forma que as emissões sejam consideradas pelo desempenho ao longo do tempo e não na resistência aos 28 dias: tCO_2/ m^3/(MPa*ano). Numa segunda possibilidade, a vida útil pode ser

adotada como a base da contabilização: (USD/tCO_2)*fator de durabilidade, definido pela razão entre a vida útil real e a projetada, para que o tempo de vida adicional ao projetado seja remunerado, ou ainda, adicionar um fator de tempo de serviço à ferramenta MAC, de tal forma que o custo de abatimento esteja ligado a um período especificado. Essas três possibilidades seguem o princípio de precificar o CO_2 de acordo com o desempenho da estrutura de concreto.

As métricas sugeridas compartilham a dependência de uma cadeia integrada, que é complexa e envolve todas as etapas: material (cimento), produtos cimentícios (concreto e argamassa) e as construções. Além disso, ao deslocar os indicadores de descarbonização das cimenteiras para as construções, há o risco de duplas contagens e dificuldade na verificação do efetivo avanço na redução das emissões (Han; Sun; Jiang, 2024). Esse risco pode ser mitigado com a rastreabilidade da atribuição da descarbonização a um único ator da cadeia. Embora a durabilidade tenha sido o foco das discussões apresentadas, ela não pode ser medida no momento da construção, mas pode ser estimada por modelagens embasadas nos requisitos das normas vigentes de vida útil de projeto, e ajustada posteriormente caso o desempenho em serviço seja distinto do previsto. Com isso, o crédito de carbono deixa de ser definitivo na sua emissão e passa a ser vinculado ao desempenho da construção.

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os custos de abatimento de CO_2 no mercado brasileiro, para as principais estratégias de descarbonização do CP e a relação com o mercado de carbono. Nas cimenteiras, as ações que resultam em custos de abatimento negativo, que representam ganhos econômicos, estão majoritariamente implementadas. A matriz energética brasileira, a disponibilidade e diversidade de MCS facilitaram tal implementação, o que praticamente já esgotou a contribuição dessas ações na descarbonização do CP. Os custos de abatimento negativos que, para cada tonelada de clínquer, chegam a 15,67 USD com o uso de MCS e 2,63 USD com o uso de combustíveis alternativos certamente justificam sua ampla implantação.

Nas cadeias de uso do cimento, para produção de concreto e argamassas e na aplicação final das construções, mesmo estratégias com custo de abatimento negativo, como é o caso da otimização dos processos e consumo do cimento ou da concepção de projetos, com abatimento negativo de até 14,57 USD e 2,36 USD por tonelada de clínquer, respectivamente, ainda carecem de implementação, o que sugere que seu lento avanço esteja mais relacionado à complexidade das cadeias do que aos custos associados.

Para alcançar a neutralidade de carbono, o uso de CCUS é indispensável e, no cenário brasileiro, o custo do clínquer pode chegar a 120,93 USD/ tonelada, com o uso dessa tecnologia. Tal valor é mais que duas vezes o preço atual do clínquer, logo, pode inviabilizar o uso desse ligante. Entretanto, expressar esse ganho econômico em termos de mercado de carbono é complexo, pela flutuação do valor dos créditos e porque atualmente os créditos de carbono não consideram a durabilidade das construções, o que pode distorcer a real efetividade da mitigação das emissões. Incorporar indicadores de vida útil aos custos de abatimento e tornar os créditos de carbono vinculados ao tempo de serviço das construções é um caminho para minimizar os riscos observados.

A consolidação das estratégias de descarbonização poderá ser por meio de estudos de engenharia econômica, com a finalidade de definir os custos reais de cada uma delas, especialmente as que não foram implementadas e demandam investimentos diretos. Estabelecer métricas que remunerem o carbono de acordo com o desempenho e a durabilidade das construções é uma forma de correlacionar o custo de abatimento e a redução efetiva das emissões.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por meio do EDITAL 08/2024 - PPGIES/ILATIT, bolsas para o programa de pós-graduação interdisciplinar em Energia & Sustentabilidade. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – edital nº 8/2024 PPGIES/ILATIT.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Juliana Gaio Somer: Conceitualização, Metodologia, Resultados e Discussão, Redação - Preparação do rascunho original. Edna Possan: Conceitualização, Supervisão, Metodologia, Discussão, Redação - Preparação do rascunho original. Redação - Revisão e Edição.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSES

As autoras declaram não ter conhecimento de quaisquer interesses financeiros ou relacionamentos pessoais conflitantes que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Durante a preparação deste trabalho, a primeira autora utilizou a ferramenta Claude (Anthropic – versão Opus 4.8) em julho de 2026 para a melhoria da clareza textual. Após o uso da ferramenta, as autoras revisaram e editaram o conteúdo, e assumem total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

REFERÊNCIAS (CAPÍTULO V)

ABNT. ABNT NBR 15575-1 Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: 2025.

ADESINA, A.; ZHANG, J. Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency. Next Sustainability, vol. 3, p. 100025, 2024.

AÏTCIN, P. C.; WILSON, W.; MINDESS, S. Concrete in Canada: 50 years of progress — Present concerns. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 45, no 2, p. 117–124, 2018.

ALYAMI, M. Probabilistic Life-Cycle Cost and Carbon Optimal Selection of Low-Clinker Concretes Under Evolving Carbon Price Trajectories. Arabian Journal for Science and Engineering, 2026.

BEGUEDOU, E. et al. Alternative Fuels Substitution in Cement Industries for Improved Energy Efficiency and Sustainability. Energies, vol. 16, no 8, 2023.

BRAMHA CHARI, K. J.; RANGA RAO, V. Durability and Microstructure Characteristics of Concrete with Supplementary Cementitious Materials. Civil Engineering Journal (Iran), vol. 8, no 4, p. 683–694, 2022.

CALDAS, L. R. et al. Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento. Working Paper DIP-BR 05/2024. Rio de Janeiro: 2024.

CHEN, H.; WU, Q.; HAN, C. Carbon Price Point and Interval-Valued Prediction Based on a Novel Hybrid Model. Energies, vol. 18, no 5, 2025.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement and Concrete Composites, vol. 32, no 8, p. 555–562, 2010.

DE LENA, E. et al. Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO2 emission cement plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 82, p. 244–260, 2019.

DYER, T. Concrete Durability. 1. ed. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2014.

ETC. Mission possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid - century. 2018.

EUROPEAN UNION. EU ETS Handbook. 2015.

FARBES, J.; HALEY, B.; JONES, R. Marginal Abatement Cost Curves for U.S. Net-Zero Energy Systems: A Systems Approach. San Francisco, CA: 2021.

GARDARSDOTTIR, S. O. et al. Comparison of technologies for CO 2 capture from cement production—Part 2: Cost analysis. Energies, vol. 12, no 3, 2019.

GCCA. Cement & Concrete Industry Net Zero Action & Progress Report 2025/26. London: 2025a.

GCCA. Cement Industry Net Zero Progress Report 2024/25. London: 2025b.

GCCA. Concrete Future: Cement Industry Net Zero Progress Report. London: 2023.

GCCA. Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. London: 2021.

GHORBANY, S.; HU, M. A systematic framework to reduce urban embodied carbon emissions using urban scale simulation. npj Urban Sustainability, vol. 5, no 1, 2025.

HAN, J.; SUN, Q.; JIANG, Y. Studying the risk spillover effects of the carbon market and high-carbon-emission industries under economic uncertainty. Frontiers in Environmental Science, vol. 12, 2024.

HELMCKE, S. et al. Understanding the price of decarbonization. McKinsey Quarterly, vol. 62, 2025.

HUANG, Z. et al. Life-Cycle Carbon Emissions (LCCE) of Buildings: Implications, Calculations, and Reductions. Elsevier Ltd, 2024.

IEA. The Breakthrough Agenda Report. 2025.

IEA; WBCSD; CSI. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry International Energy Agency. 2018.

JOHNSSON, F.; NORMANN, F.; SVENSSON, E. Marginal Abatement Cost Curve of Industrial CO2 Capture and Storage – A Swedish Case Study. Frontiers in Energy Research, vol. 8, 2020.

KESICKI, F.; EKINS, P. Marginal abatement cost curves: a call for caution. Climate Policy, vol. 12, no 2, p. 219–236, 2012.

KIM, T. et al. Proposal for the evaluation of eco-efficient concrete. Sustainability (Switzerland), vol. 8, no 8, 2016.

KIPKEMBOI, B. et al. Effect of C3S content of clinker on properties of fly ash cement concrete. Construction and Building Materials, vol. 240, 2020.

LI, Y.; WANG, X.; QIN, Q. Comparative Analysis of Carbon Tax and Carbon Market Strategies for Facilitating Carbon Neutrality in China's Coal-Fired Electricity Sector. Sustainability (Switzerland), vol. 17, no 5, 2025.

MACINTOSH, A. et al. Carbon credits are failing to help with climate change — here's why. Nature, vol. 646, p. 543–546, 2025.

MARTINS DE CARVALHO, M.; SOUZA MAGALHÃES, A. Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento. Rio de Janeiro: 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 3rd. ed. McGraw-Hill, 2006.

NAKHLE, C. ; ECKLE, P. R. ;; KRÜGER, M. Decarbonizing Cement: Technology assessment and

policy relevant evidence for the decarbonization of the Swiss cement industry. Bern: 2022.

NATALLI, J. F. et al. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 14, no 6, 2021.

NITI AAYOG. Roadmap for CEMENT SECTOR DECARBONISATION. Nova Delhi: 2026.

NORDHAUS, W. A Question of Balance Weighing the Options on Global Warming Policies. 2008.

OECD. Zero Carbon Buildings in Cities: A Whole Life-Cycle Approach: OECD Urban Studies. Paris: OECD Publishing, 2025.

PAPAMICHAEL, I. et al. Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. Waste Management and Research, vol. 41, no 12, p. 1728–1740, 2023.

PAZ, C. F. et al. Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 25, no 2, p. 1082–1095, 2023.

POSSAN, E. Between green and gray: decarbonization of Portland cement and durability of concrete – a critical review. Revista ALCONPAT, vol. 16, no 1, p. 42–59, 2026.

POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; ANDRADE, J. J. O. A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, vol. 3, no 1, 2018.

REIS, D. C. et al. Estratégias de Descarbonização das Indústrias do Cimento e do Aço e o Papel do Setor Florestal no que Tange à Construção Civil: Estratégias de Descarbonização das Indústrias do Cimento e do Aço e o Papel do Setor Florestal no que Tange à Construção Civil. São Paulo: 2023.

ROWAIHY, F. et al. Decarbonizing Saudi Arabia energy and industrial sectors: Assessment of carbon capture cost. Carbon Capture Science and Technology, vol. 14, 2025.

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, vol. 114, p. 2–26, 2018.

SNIC. Relatório Anual. São Paulo: 2023.

SNIC. Relatório anual. São Paulo: 2024.

SNIC; ABCP. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: 2019.

STAVINS, R. N. Carbon Taxes vs. Cap and Trade: Theory and Practice. Discussion Paper ES 2019-9. Cambrigde: 2019.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2003/87/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. 2023.

VOLDSUND, M. et al. Comparison of technologies for CO 2 capture from cement production—

Part 1: Technical evaluation. Energies, vol. 12, no 3, 2019.

WORLD BANK. Carbon Pricing Dashboard. 2026a. Disponível em: https://https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/dashboard#carbonCreditTab. Acesso em: 3 ago. 2026.

WORLD BANK. State and Trends of Carbon Pricing. Washington, DC: 2026b.

ZHANG, Y.; PUAAN, Y. Assessing whole-life carbon emissions and retrofit strategies using integrated building stock and energy modeling at the metropolitan scale. Energy and Buildings, vol. 350, p. 116332, 2026.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese teve como objetivo analisar a descarbonização da construção civil a partir do fluxo do Cimento Portland, da fabricação do material à aplicação do concreto, com uma abordagem integrativa, avaliando as implicações de custos e durabilidade. Diante de um setor que responde por cerca de 7% das emissões antropogênicas globais de CO_2, a análise buscou compreender as metas estabelecidas para cada elo da cadeia, bem como quantificar os custos de abatimento no cenário brasileiro, uma vez que a neutralidade de carbono em 2050 será fruto de um trabalho conjunto.

Os dois artigos que estruturam a tese evidenciam a complexidade de implementação das estratégias, que é crescente ao longo da cadeia: menor na produção do cimento e maior na construção. Exatamente por isso, as ações de descarbonização amplamente implementadas estão concentradas nas cimenteiras, sobretudo aquelas que são economicamente mais vantajosas. O potencial ainda a explorar, voltado à otimização de processos e consumo de cimento, uso de agregados menos emissivos e mudanças na concepção de projetos, está concentrado nas cadeias subsequentes. Sua implementação passa pelo rompimento de paradigmas, industrialização de processos e qualificação da mão de obra.

Os resultados dos cálculos de abatimento das emissões mostram que a estratégia de redução do teor de clínquer pelo uso de MCS é uma rota atrativa, pela redução nas emissões e ganhos financeiros. No Brasil, esta ação pode responder por, no mínimo, 37% e até 69% das emissões evitadas pelo setor, com custo de abatimento negativo e economia equivalente a até 30% do valor do clínquer. No contexto nacional, esta rota é favorecida pela matriz energética predominantemente renovável e pela diversidade de MCS. Em contrapartida, as tecnologias de CCUS, com potencial de até 42% da meta global, permanece em estágio inicial, ainda limitadas por custo elevado, baixa maturidade tecnológica e carência regulatória. A projeção de avanço nessa rota deve ocorrer a partir de 2030, com a perspectiva de duplicar o preço do clínquer.

Esta tese também contribui ao demonstrar que a viabilidade das rotas traçadas não pode ser concentrada nos custos e potencial de abatimento. As alterações físico-químicas nos cimentos com menor teor de clínquer tende a resultar em maior finura, por vezes maiores teores de C_3S e C_3A e menor reserva alcalina, características com implicações diretas sobre a durabilidade dos materiais à base de cimento. A revisão da literatura mostrou que a produção científica se concentra na avaliação de propriedades mecânicas e físico-químicas, enquanto a durabilidade, quando abordada, é restrita sobretudo à penetração de cloretos e à resistência à carbonatação. Predominam ensaios de um único parâmetro e de curta duração, o que resulta em incerteza sobre o desempenho ao longo da

vida útil das construções. A ausência de estudos de longo prazo e que integrem a cadeia compõem uma lacuna crítica e expõe um risco sistêmico não declarado: o *trade-off* de um cimento de baixo carbono que pode comprometer a durabilidade das estruturas.

Com esses resultados, a tese demonstra que a descarbonização efetiva do setor requer correlacionar as propriedades dos cimentos menos emissivos, os custos de abatimento e a durabilidade das construções, integrando o cimento ao fim do ciclo de vida do concreto. A avaliação holística do ciclo de vida evidenciará que os ganhos ambientais projetados são obtidos, e não são anulados ao longo da cadeia por dosagens excessivas, especificações inadequadas ou vida útil aquém do projetado. Alcançar a meta de carbono neutro em 2050 requer trabalho conjunto de múltiplos atores: o setor público, no campo da regulação, o privado, na implementação das ações de descarbonização e a academia, no desenvolvimento de tecnologias necessárias.

Transversal à descarbonização e à durabilidade está o mercado de carbono, que muitas vezes parece ambientalmente sustentável, especialmente quando traz lucros financeiros. Deste aspecto procede a necessidade de atrelar as compensações de carbono ao desempenho e vida útil das construções. Mais uma vez, a integração entre as cadeias é inegociável para descarbonizar o CP.

As pesquisas futuras recomendadas são para o desenvolvimento e a validação do CCUS em escala comercial; a avaliação do impacto da redução do teor de clínquer e dos MCS emergentes sobre a durabilidade das construções e a mensuração efetiva das emissões evitadas ao longo do ciclo de vida.

APÊNDICE A

SUPPLEMENTARY MATERIAL [CAPÍTULO IV | ESTUDO B]

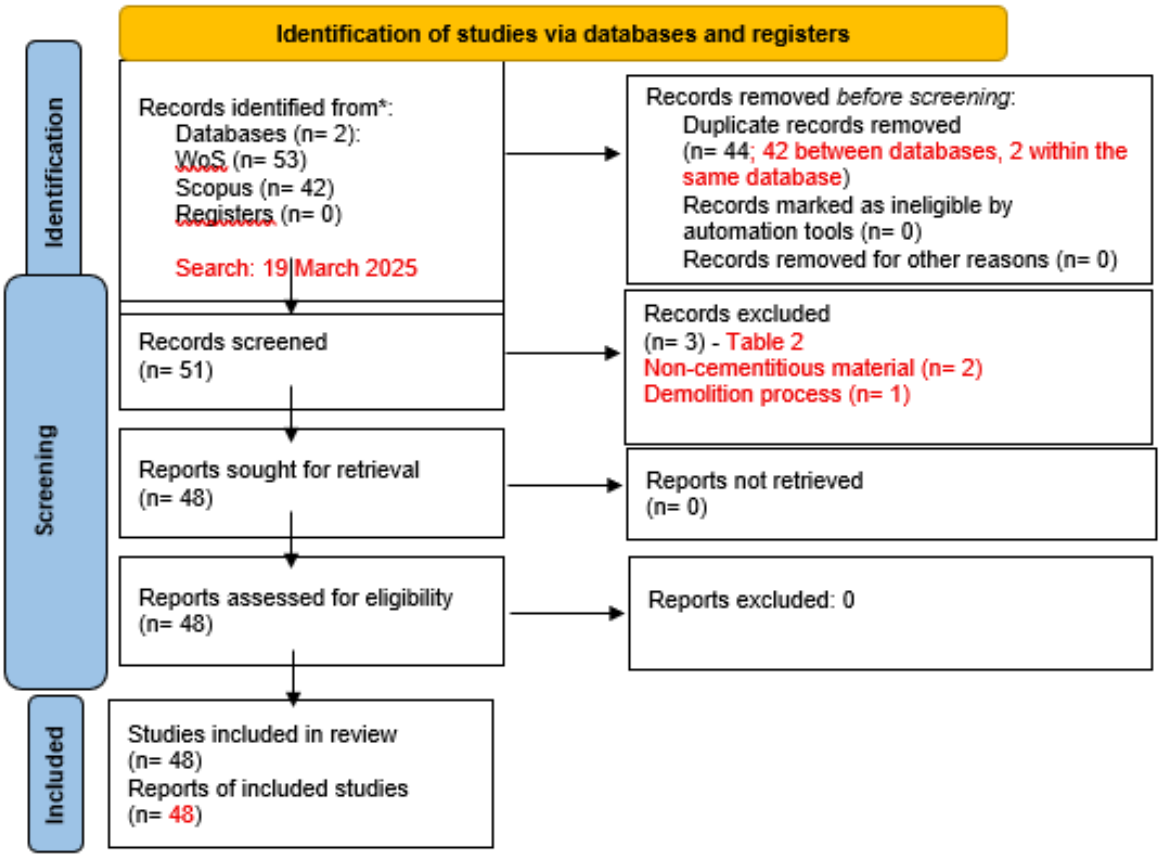


Figure 1S: Prisma flow diagram.

Table 1S: Included articles

Title	Author	Year	Publisher	Journal	InOrdinatio
Microstructure and durability of alkali-activated materials as key parameters for standardization	VAN DEVENTER, J. S. J. et al.	2015	TAYLOR & FRANCIS LTD	JOURNAL OF SUSTAINABLE CEMENT-BASED MATERIALS	215,14
Passivation and Pitting Corrosion Behavior of a Novel Alloy Steel (00Cr10MoV) in Simulated Concrete Pore Solution	SHI, J. et al	2018	ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS	JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING	99,74
Simulation for optimal mixture design of low-CO2 high-volume fly ash concrete considering climate change and CO2 uptake	WANG, X.-Y.	2019	ELSEVIER SCI LTD	CEMENT & CONCRETE COMPOSITES	179,55
Optimal mix design of low-CO2 blended concrete with limestone powder	WANG, X.-Y.	2020	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	71,04
Durability of mortar matrices of low-cement concrete with specific additions	SOLDADO, E. et al.	2021	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	104,37
Performance of Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Coal Fly Ash Ternary Portland Cements Exposed to Natural Carbonation	ABNELIA RIVERA, R. et al.	2021	MDPI	MATERIALS	176,70
Multi-Objective Optimization Methods for Designing Low-Carbon Concrete Mixtures	DEROUSSEAU, M. A.; KASPRZYK, J. R.; SRUBAR III, W. V	2021	FRONTIERS MEDIA AS	FRONTIERS IN MATERIALS	136,04
Design Service Life of RC Structures with Self-Healing Behaviour to Increase Infrastructure Carbon Savings	BRAS, A. et al.	2021	MDPI	MATERIALS	83,04
Optimal mix design of air-entrained slag blended concrete considering durability and sustainability	WANG, X.-Y.; LEE, H.-S	2021	TECHNO-PRESS	ADVANCES IN CONCRETE CONSTRUCTION	112,70
Experimental study on optimum proportioning of Portland cements, limestone, metakaolin, and fly ash for obtaining quaternary cementitious composites	LIN, R.-S.; HAN, Y.; WANG, X.-Y	2021	ELSEVIER	CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS	107,70
Durability performance of reinforced waste-based geopolymer foam concrete under exposure to various corrosive environments	WASIM, M.; NGO, T. D.; LAW, D.	2021	ELSEVIER	CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS	33,37

Enhanced mechanical and durability performances of low cement concrete with natural pozzolan addition	ROBALO, K. et al.	2021	Japan Concrete Institute	Journal of Advanced Concrete Technology	87,70
OPTIMAL DESIGN OF LOW-CARBON CONCRETE CONTAINING FLY ASH AND LIMESTONE POWDER	WANG, X.-Y.	2022	UNIV CHEMISTRY & TECHNOLOGY, PRAGUE	CERAMICS-SILIKATY	37,68
CO2 and Cost-Based Optimum Design of Sustainable Metakaolin-Modified Concrete	WANG, X.	2022	TECH SCIENCE PRESS	JOURNAL OF RENEWABLE MATERIALS	25,68
Service-Life Design of Low-Carbon Concrete Containing Fly Ash and Slag under Marine Tidal Conditions	SIRIVIVATNANON, V.; XUE, C.; KHATRI, R.	2022	AMER CONCRETE INST	ACI MATERIALS JOURNAL	204,68
Green Protective Geopolymer Coatings: Interface Characterization, Modification and Life-Cycle Analysis	WANG, A. et al.	2022	MDPI	MATERIALS	115,68
CO2 Optimal Design of Fly Ash Marine Concrete with Global Warming and Stress Types	WANG, X.-Y.	2022	AMER CONCRETE INST	ACI MATERIALS JOURNAL	20,68
Pre-bcc: A novel integrated machine learning framework for predicting mechanical and durability properties of blended cement concrete	HAFEZ, H. et al.	2022	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	214,68
Study on frost resistance of EPS concrete based on EPS beads wrapping modification	YUAN, J. et al.	2022	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	109,68
Evolution of structural and mechanical properties of concrete exposed to high concentration CO2	XUE, Q. et al.	2022	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	165,68
Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective	LI, C. et al.	2023	ELSEVIER SCI LTD	CEMENT & CONCRETE COMPOSITES	206,00
A comprehensive review of cementitious composites modified with nanosilica: Fabrication, microstructures, properties and applications	ZHANG, L. et al.	2023	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	136,00
Hydration characteristics, structure evolution of marine cement composites with high durability modified by colloidal nano-silica for low carbon footprints	XU, J. et al.	2023	ELSEVIER	JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING	1073,00

Self-healing behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) blended with limestone calcined clay cement	WANG, L. et al.	2023	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	206,00
Decarbonization of the concrete railway sleeper production: bringing the low-dosage pozzolanic cement usage in the sleeper production via novel laminated CFRPU reinforcement technique	CECEN, F.; AKTAS, B.; OZBAYRAK, A.	2023	ELSEVIER	MATERIALS TODAY SUSTAINABILITY	66,00
Effect of microcapsules on the self-repairing ability of limestone calcined clay cement (LC3) mortar at different temperatures	DU, W. et al.	2023	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	134,00
Identification of mechanical properties of a braided alfa stem (Stipa tenacissima L.) by an inverse method	HELAILI, S.; CHAFRA, M.	2023	SAGE PUBLICATIONS LTD	JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS	167,00
Evolution of fib model codes: Mastering challenges and encountering new ones	KASUGA, A.	2023	John Wiley and Sons Inc	Structural Concrete	86,00
Optimization design of low-carbon hybrid concrete containing slag and limestone powder	WANG, X.-Y.	2023	Springer Science and Business Media Deutschland GmbH	Environmental Science and Pollution Research	266,00
Solutions to achieve carbon-neutral mixtures for the U.S. pavement network	AZARIJAFARI, H. et al	2023	Springer Science and Business Media Deutschland GmbH	International Journal of Life Cycle Assessment	263,00
Enhancement of mechanical properties, durability and service life of low carbon cement paste with super low w/c ratio by incorporating carbon fiber	DIAO, Z. et al	2024	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	47,00
Microstructure and macroscopic properties of low-carbon concrete subjected to elevated temperature: State-of-the-Art Review	LI, Y.; LIU, Z.; JIANG, J.	2024	ELSEVIER	JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING	158,00
Low carbon concrete for prefabricated modular construction in circular economy: An integrated approach towards sustainability, durability, cost, and mechanical performances	CHEN, L. et al	2024	ELSEVIER	JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING	126,00

Geopolymer composites for marine application: Structural properties and durability	LI, H. et al.	2024	ELSEVIER SCI LTD	CEMENT & CONCRETE COMPOSITES	393,00
A Review on Research Progress of Corrosion Resistance of Alkali-Activated Slag Cement Concrete	LIANG, Q. et al.	2024	MDPI	MATERIALS	136,00
Development of more accurate methods for determining carbonation depth in cement-based materials	ZHANG, K. et al	2024	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD	CEMENT AND CONCRETE RESEARCH	130,00
Environmental impact evaluation of low-carbon concrete incorporating fly ash and limestone	THORNE, J. et al.	2024	ELSEVIER	CLEANER MATERIALS	97,00
Recycling potential evaluation of geopolymer concrete with different cementitious system used in freeze-thaw environment	LIU, M. et al.	2024	ELSEVIER	CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS	233,00
Experimental investigation into demountable dry connections for fully precast frame structures through shaking table tests	ZHANG, R.; GUO, T.; LI, A.	2024	ELSEVIER SCI LTD	THIN-WALLED STRUCTURES	224,00
Development of anti-segregation device and uniformity evaluation for all-bamboo aggregate concrete	CHEN, X. et al.	2024	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	154,00
Multiple impact dynamic compression properties of lightweight engineered geopolymer composites containing ceramsite under different initial impact damages	CHENG, Z. et al	2024	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	146,00
Strength and Expansion of LHEC with Different Gypsum Contents Under Thermal Curing	JIN, B. et al.	2024	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)	Materials	82,00
Accounting for decarbonization impacts across the full life cycle of alternative concrete materials: A case-study for graphene-amended cementitious composites	JIANG, Z. et al.	2024	Elsevier Ltd	Journal of Cleaner Production	84,00
Study on the workability, strength, durability and environmental performance of alkali-activated electrolytic manganese slag-fly ash-slag grouting materials	CHEN, Y. et al.	2025	ELSEVIER	CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS	38,00
Analysis of the Strength Development, CO₂ Emissions, and Optimized Low-Carbon Design of Fly-Ash-Enhanced Composite Concrete	YANG, B.; DONG, Y.; WANG, X.-Y	2025	MDPI	BUILDINGS	158,00

Long-term deformation and prestress loss of PRC beam under vari-humidity environment: Preliminary experiments and multi-scale simulations	HUANG, Z. et al.	2025	ELSEVIER SCI LTD	ENGINEERING STRUCTURES	117,00
Cradle-to-grave life-cycle assessment of ultra-high-performance concrete (UHPC) beams based on real-time monitoring data	GHAHSAREH, F. M. et al	2025	ELSEVIER SCI LTD	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	64,00
Recent developments in Low-Carbon Engineered Cementitious Composites (ECC)	LEI, D. et al.	2025	Elsevier Ltd	Journal of Building Engineering	106,00

Table 2S: Excluded articles

Title	Author	Year	Publisher	Journal	Excluded
Durability evaluation of pultruded GFRP bay window structures	WU, Y. et al	2021	ELSEVIER SCI LTD	COMPOSITE STRUCTURES	Non-cementitious material
Research progress and future prospective of soundless chemical demolition agents (SCDAs) and associated applications	ZHONG, Z. et al	2023	ELSEVIER SCI LTD	CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	Study focused on demolition process
Influence of Modification on the Characteristics of Reinforcing Steels Intended for Reinforced Concrete Structures	POLISHKO, S. O.	2023	G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of N.A.S. of Ukraine	Progress in Physics of Metals	Non-cementitious material

Table 3S: Search protocol

Database	**Search string**	**Search fields**	**Filters**	**Search date**	**Articles**
WoS	"Cement*" OR "Clinker" OR "Concrete*" OR "Mortar*" **AND** "Decarbonization" OR "Net zero" OR "Low carbon" OR "Low CO2" **AND** "Performance" OR "Eco-efficient" OR "Durability" **AND** "Service life" OR "Useful life"	Topic (Title; Abstract; Keywords)	2014-2025; Article and Review articles; Language (English)	19/03/2025	53
Scopus		Title; Abstract; Keywords			42

Table 4S: Summary of experimental studies and their methodological quality/ risk-of-bias assessment

Material used	Test time	Ref.	Reference mixture	Replication	Standardized test method	Exposure duration	Mix & curing reporting	Overall risk of bias
Reinforced concrete (PC with pozzolan and slag)	9 Years	(Sirivivatnanon; Xue; Khatri, 2022)	Low	Moderate	Moderate	Low	Low	Moderate
Mortar (PC and Low-heat expansive cement)	120 Days	(Jin *et al.*, 2024)	High	Low	Moderate	Moderate	Low	High
Reinforced concrete (PC with pozzolan)	90 Days	(Robalo *et al.*, 2021)	Low	Low	Moderate	Moderate	Low	Moderate
Ternary Portland cements and Mortar	20 Months	(Rivera *et al.*, 2021)	Low	Moderate	Low	Low	Low	Low
Reinforced waste-based geopolymer foam concrete	90 Days	(Wasim; Ngo; Law, 2021)	High	Low	Low	Moderate	Low	High
Concrete (PC)	28 Days	(Xue *et al.*, 2022)	Low	High	Low	High	Low	High
Mortar (LC3)	28 Days	(Du *et al.*, 2023)	High	Low	High	High	Low	High
Expanded polystyrene (EPS) concrete	275 freeze-thaw cycles	(Yuan *et al.*, 2022)	Low	Moderate	Low	Moderate	Low	Moderate
Fiber-reinforced (CP) and LC3 concrete	48 Days	(Wang, Lei *et al.*, 2023)	Low	Low	Low	Moderate	Low	Low
Pastes and mortar (PC with fly ash and slag)	3 Months	(Zhang *et al.*, 2024)	Low	Low	Moderate	Moderate	Low	Moderate
Reinforced concrete (PC with fly ash and slag)	10 Months	(Huang *et al.*, 2025)	Low	Moderate	Low	Moderate	Low	Moderate
Cement Pastes (PC with fly ash, limestone and metakaolin)	28 Days	(Lin; Han; Wang, 2021)	High	Low	Low	High	Low	High
Concrete (PC)	28 Days	(Chen, Xiang *et al.*, 2024)	Low	Low	Low	High	Low	High
Cement Paste (PC with Colloidal nano-silica)	28 Days	(Xu *et al.*, 2023)	Moderate	Low	Low	High	Low	High
Geopolymer Paste (with Steel fiber and ceramsite)	28 Days	(Cheng *et al.*, 2024)	Moderate	Low	Low	High	Low	High
Cement Paste (PC with limestone powder)	540 Days	(Wang, 2020)	Moderate	Low	Low	Low	Low	Low
Cement Paste (PC with slag)	28 Days	(Wang; Lee, 2021)	Moderate	Moderate	Low	High	Low	High
Cement Paste (Coal slag and steel slag)	28 Days	(Chen, Yongquan *et al.*, 2025)	Moderate	Low	Low	High	Low	High
Geopolymer concrete (with fly ash, red mud and slag)	28 Days	(Liu *et al.*, 2024)	Moderate	Low	Low	High	Low	High
Geopolymer mortars (with slag, red mud, metakaolin and fly ash)	1 Year	(Wang *et al.*, 2022)	Low	Moderate	Low	Low	Low	Low
Reinforced concrete (PC with pozzolan)	28 Days	(Cecen; Aktas; Ozbayrak, 2023)	Low	Low	Low	High	Low	High

Cement Paste (PC) reinforced with carbon fiber	150 Days	(Diao *et al.*, 2024)	Moderate	Low	Low	Moderate	Low	Moderate
Ultra-high-performance concrete (PC with slag) reinforced with fibers	28 Days	(Ghahsareh *et al.*, 2025)	Low	Low	Low	High	Low	High
Natural fibers in epoxy base	1 Day	(Helaili; Chafra, 2023)	Moderate	Low	Low	High	Low	High
Mortars (PC with fly ash, limetone filler, pozzolan and slag)	90 Days	(Soldado *et al.*, 2021)	Low	Low	Low	Moderate	Low	Low
Concretes (PC with fly ash and slag)	90 Days	(Van Deventer *et al.*, 2015)	Low	Low	Low	Moderate	Low	Low
Concretes (PC with silica, calcined clay and limestone)	28 Days	(Chen, Lijie *et al.*, 2024)	Low	Low	Moderate	High	Low	High

Exposure duration — pre-filled rule: ≤28 days → High; >28 days to <12 months → Moderate; ≥12 months → Low.
Reference mixture — Low: control/base binder under the same conditions; Moderate: reference not fully comparable; High: no control mixture.
Replication — Low: ≥3 specimens or replicates with dispersion; Moderate: 2 specimens or replication without n; High: single specimen / not reported.
Standardized test method — Low: recognized standard or validated protocol; Moderate: adapted or uncited standard; High: ad hoc, insufficiently described.
Mix proportions & curing reporting — Low: full mix (w/b, binder proportions, % addition) and curing reported; Moderate: partial; High: key parameters missing.
Low if all/most domains Low; High if ≥2 domains High or if Reference mixture or Exposure duration (critical) is High; Moderate otherwise.
Single-reviewer mitigation — a second author independently re-applied this matrix to a random ~25% of studies; with full agreement between reviewers.

APÊNDICE B

MATERIAL SUPLEMENTAR (CAPÍTULO V | ESTUDO C)

Tabela 1S: Cálculos dos custos de abatimento das emissões

Tipo	Estratégia	Nível da cadeia	Nº	Componente de custo / receita	Unidade	Tipo de dado	Cenários			Ref.
							Inferior (a)	Intermediário (b)	Superior (c)	
Tipo A: base clínquer										
A	Processamento de MCS (para substituir clínquer)	Cimento	A1	Custo do MCS	USD/ t de MCS	Entrada	$45,93	$10,10	$2,00	
			A2	Custos com processamento adicional, quando aplicáveis (moagem, calcinação)	USD/ t de MCS	Entrada	$1,93	$5,86	$1,38	[1; 2;3;4]
			A3	Custo da adaptação de processo/ formulação	USD/ t de MCS	Entrada	$2,99	$2,99	$2,99	[5]
			A4	Custo do clínquer	USD/ t de clínquer	Entrada	$52,45	$52,45	$52,45	
			A5	Fator de emissão do clínquer	tCO_2/ t de clínquer	Entrada	0,89	0,89	0,89	
			A6	Fator de emissão do MCS	tCO_2/ t de clínquer	Entrada	0,00	0,30	0,00	
			A7	Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	Calculado	-$1,81	-$56,47	-$51,78	
A	Aumento da reatividade do clínquer	Cimento	A2	Custo para moagem adicional	USD/ t clínquer	Entrada	$0,58	$0,58	$0,58	[6]
			A3	Custo da adaptação de processo	USD/ t clínquer	Entrada	$1,49	$1,49	$1,49	[5]
			A8	Economia de clínquer no cimento	%	Entrada	3%	5%	10%	
			A4	Custo do clínquer	USD/ t de clínquer	Entrada	$52,45	$52,45	$52,45	
			A5	Emissão evitada	tCO_2/ t de clínquer	Entrada	0,03	0,04	0,09	
			A10	Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	Calculado	$18,60	-$12,36	-$35,68	
A	Eficiência energética	Cimento	A11	Redução de energia térmica	%	Entrada	2,50%	5%	10%	[7]
			A12	Redução de energia elétrica	%	Entrada	2,50%	3%	5%	
			A13	Custo para retrofit médio da planta (eficiência equipamentos)	USD/ t clínquer	Entrada	$0,05	$0,07	$0,11	

[1] IFC. Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: International best practice. Washington, D.C: 2017.
[2] JOSEPH, Shiju; BISHNOI, Shashank; MAITY, Soumen. An economic analysis of the production of limestone calcined clay cement in India. The Indian Concrete Journal, v. 90, n. 9, 2016.
[3] IEA. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. Paris: set. 2023.
[4] INSTITUTE FOR INDUSTRAL PRODUCTIVITY. Cement - Industrial Efficiency Technology & Measures. Disponível em: <https://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/cement.html#benchmarks>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[5] SCRIVENER, K *et al. Financial Attractiveness of LC3*. Lausanne: 2019.
[6] MITCHELL, Nicolas Robert. Cement Grinding Energy Efficiency: Optimizing Mill Performance, 7 mar. 2026.
[7] IFC. Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: International best practice. Washington, D.C, 2017.

			A14	Custo para retrofit da planta (eletrificação)	USD/ t clínquer	Entrada	$0,17	$0,20	$0,26	
			A15	Economia de energia	USD/ t clínquer	Calculado	$0,29	$0,53	$1,03	
			A16	Emissão evitada	tCO_2/ t de clínquer	Calculado	0,0086	0,0171	0,0341	[8] [9]
A	Combustíveis alternativos	Cimento	A18	Valor com combustível alternativo (receita ou despesa)	USD/ t clínquer	Calculado	$4,13	$0,00	-$1,76	[10]
			A19	Custo com combustível	USD/ t clínquer	Calculado	$8,96	$8,96	$8,96	
			A20	Custo da adaptação de processo	USD/ t clínquer	Entrada	$2,00	$2,00	$2,00	[11]
			A21	Fator de emissão evitada dos combustíveis	tCO_2/ t de clínquer	Calculado	0,254	0,170	0,109	
			A22	Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	Calculado	-$2,34	-$14,63	-$24,21	
A	Otimização de processos e consumo de cimento	Concreto	A23	Custo incremental na formulação do cimento	USD/ m³ de concreto	Entrada	$3,67	$3,67	$3,67	
			A4	Custo do clínquer	USD/ t de clínquer	Entrada	$52,45	$52,45	$52,45	
			A24	Economia por menor consumo de cimento/ m³	USD/ m³ de concreto	Calculado	$2,45	$3,67	$6,12	[12]
			A25	Fator de emissão evitada	tCO_2/ m³ de concreto	Calculado	0,015	0,022	0,037	
			A26	Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitada	Calculado	$81,86	$0,00	-$65,49	
A	Concepção, projeto e redução de perdas	Construção	A27	Custo de projeto otimizado	USD/ m² de área construída	Entrada	$1,72	$1,72	$1,72	
			A28	Economia por menor consumo de cimento	USD/ m² de área construída	Entrada	$0,73	$1,10	$1,84	[13]
			A29	Redução no consumo de cimento/m² construído	tCO_2/ m² construído	Calculado	0,0045	0,0067	0,0112	
			A30	Custo de abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	Calculado	$219,06	$91,47	-$10,60	
A	Aumento da durabilidade	Concreto	A31	Custo incremental do concreto durável	USD / m³ de concreto	Entrada	$2,45	$3,67	$4,90	[14]
			A32	Economia por reposição evitada	USD / m³ de concreto	Calculado	$2,45	$4,90	$9,79	
			A33	Emissão evitada (reposição não realizada)	tCO_2 / m³ de concreto	Calculado	0,0150	0,0299	0,0598	
			A34	Aumento de durabilidade (nova fração evitada)	%	Entrada	10%	20%	40%	
			A35	Custo de abatimento líquido	USD / tCO_2 evitada	Calculado	$0,00	-$40,93	-$81,86	
TIPO B — Nivelada em USD/ tCO2										
B	Carbonatação natural	Concreto	B1	Custo incremental direto	USD / tCO_2 absorvida	Entrada	$0,00	$0,00	$0,00	
			B2	Receita / crédito de carbono contabilizado	USD / tCO_2 absorvida	Entrada	$30,00	$30,00	$30,00	[14]
			B3	Custo de abatimento líquido	USD / tCO_2 absorvida	Calculado	-$30,00	-$30,00	-$30,00	
B		Concreto	B4	Preço do agregado graúdo natural substituído	USD/ t de agregado	Entrada	$15,81	$15,81	$15,81	

[8] GARG, Amir; KAZUNARI, Kainou; PULLES, Tinus. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, 2006. v. 2.
[9] GCCA. Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. . London, 12 out. 2021.
[10] SEVEN RESÍDUOS. CONAMA 499/2020 e Coprocessamento em Cimenteira: Guia Técnico. Disponível em: <https://sevenresiduos.com.br/conama-499-2020-coprocessamento-cimenteira-forno-clinquer/>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[11] EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY. European Cement Research Academy Chairman of the advisory board. Genebra. 20 mar. 2017.
[12] SNIC; ABCP. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019.
[13] ABNT NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 25 fev. 2022
[14] BANCO MUNDIAL. Compliance Price - Carbon Pricing Dashboard. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>. Acesso em: 24 jul. 2026.

Agregados menos emissivos		B5	Fator de substituição por agregado reciclado	%	Entrada	5%	10%	30%	
		B6	Custo do agregado misto (natural + reciclado)	USD/ t de agregado	Calculado	$15,61	$15,42	$14,62	[15]
		B7	Fator de emissão do agregado natural	tCO_2/ t de agregado	Entrada	0,0028	0,0028	0,0028	[16]
		B8	Fator de emissão do agregado reciclado	tCO_2/ t de agregado	Entrada	0,0008	0,0008	0,0008	
		B9	Fator de emissão do agregado substituído	tCO_2/ t de agregado	Calculado	0,0027	0,0026	0,0022	
		B10	Custo de abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	Calculado	-$1.910,28	-$1.910,28	-$1.910,28	
Tipo C: captura no forno (CCUS)									
C	CCUS	Cimento	C1	Captura no forno (CAPEX, OPEX)	USD/ tCO_2 evitado	Entrada	$82,00	$55,00	$42,00	[17] [18] [19]
			C2	Transporte de CO_2 (tubulação)	USD/ tCO_2	Entrada	$10,00	$10,00	$10,00	[20] [21]
			C3	Estocagem geológica	USD/ tCO_2	Entrada	$15,00	$15,00	$15,00	[21]
			C4	Fator de emissão do clínquer	tCO_2/ t de clínquer	Entrada	0,89	0,89	0,89	
			C5	Taxa de CO_2 evitado	%	Entrada	64%	73%	82%	[20]
			C6	CO_2 evitado por tonelada de clínquer	tCO_2/ t de clínquer	Calculado	0,57	0,65	0,73	
			C7	Custo do abatimento líquido	USD/ tCO_2 evitado	Calculado	$107,00	$80,00	$67,00	

[15] PINTO, Ana Beatriz Pereira et al. Agregados reciclados em pavimentação de concreto. REVISTA DELOS, v. 18, n. 68, p. e5373, 4 jun. 2025.
[16] SIDAC. Busca Produtos. Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[17] GARDARSDOTTIR, Stefania Osk et al. Comparison of technologies for CO2 capture from cement production —Part 2: Cost analysis. Energies, v. 12, n. 3, 9 fev. 2019.
[18] DE LENA, Edoardo et al. Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO2 emission cement plants. International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 82, p. 244–260, 1 mar. 2019.
[19] VOLDSUND, Mari et al. Comparison of technologies for CO 2 capture from cement production—Part 1: Technical evaluation. Energies, v. 12, n. 3, 12 fev. 2019.
[20] NEELE, Filip et al. CO2 Transport and Storage Availability, nov. 2025. Disponível em: <https://ieaghg.org/publications/co2-transport-and-storage-availability/>.
[21] STOLAROFF, Joshuah K. et al. Transport Cost for Carbon Removal Projects With Biomass and CO2 Storage. Frontiers in Energy Research, v. 9, 12 maio 2021.

Tabela 2S: Premissas assumidas nos cálculos

Item		Valor	Unidade	Complemento	Ref.
Cotação do Dólar (julho/ 26)		R$ 5,06			[22]
Cotação do Euro (julho/ 26)		R$ 5,77			
A1	b e c	R$ 0,30	t*km	Frete até 100km	[23]
A1	c	$40,00	t		[24] [25]
A1	b	R$ 21,10	t	Valor médio entre os anos 2019 a 2024	[26]
A2		$ 46,05		Custo do MWh (Mercado livre de energia)	[27]
A2		$ 42,00	kWh/ t	Consumo energético moinho de bolas	[28]
A3		$ 20,00	MM	Capex estimado para retrofit uma planta média	
A3		40,20	Mt	Produção brasileira clínquer 2025	[29]
A4		$ 52		46 Euros	[30]
A5		0,89	tCO2/t clínquer	Fator total do clínquer	[31]
A6	c	0,30	tCO2/t	1/3 das emissões do clínquer	[35]
A18		3,48	GJ/t clínquer	Consumo energético	[32]
A18	a	25,00	GJ/ton	PCI coprocessamento "médio"	[33]

[22] BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Cotação de moedas*. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 24 jul. 2026

[23] SIFRECA. *Departamento de Economia, Administração e Sociologia Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*. Disponível em: <https://sifreca.esalq.usp.br/>. Acesso em: 24 jul. 2026.

[24] KUMAR, Virendra; KUMAR, Amit; PRASAD, Brajkishor. Mechanical behavior of non-silicate based alkali-activated ground granulated blast furnace slag. Construction and Building Materials, v. 198, p. 494–500, 20 fev. 2019

[25] IMARC GROUP. GGBFS Price Trend, Chart, Index, Forecast & Trend. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/ground-granulated-blast-furnace-slag-pricing-report?utm_source>. Acesso em: 24 jul. 2026.

[26] IBRAM. ANUÁRIO IBRAM MINERAÇÃO DO BRASIL. . Brasília, 2025. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>.

[27] ABRACEEL. Preço da energia no mercado livre dispara em dois anos. Disponível em: <https://abraceel.com.br/destaques/2026/04/preco-da-energia-no-mercado-livre-dispara-em-dois-anos/>. Acesso em: 24 jul. 2026.

[28] IFC. Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: International best practice. Washington, D.C: 2017.

[29] SCRIVENER, K *et al. Financial Attractiveness of LC3*. Lausanne: 2019.

[30] SNIC. Resultados Preliminares de Dezembro 2025. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=116>. Acesso em: 24 jul. 2026.

[31] STRUNGE, Till *et al.* Finding least-cost net-zero CO2 e strategies for the European cement industry using geospatial techno-economic modelling. *RSC Sustainability*, v. 2, n. 10, p. 3054–3076, 13 set. 2024.

[32] CHEAH, Chee Ban *et al.* Calcined clay as a low-carbon cementitious material: Comprehensive review of treatment method, properties, and performance in concrete. *Cleaner Waste Systems*, v. 11, 1 jun. 2025.

[33] SNIC; ABCP. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro, 2019.

A18	b	$ 39,53	tonelada	Custo ou *gate fee* combustível alternativo	[34]
A15		$ 85,00	tonelada	Custo coque de petróleo	[35]
A15		33,00	GJ/ton	PCI coque de petróleo	[36]
A20	a	2,00	USD/t clínquer	Custo mínimo adaptação processos fornos	
A24		60%	Fator clínquer/cimento médio no BR		[37]
A24		0,28	Consumo de cimento/ m^3 de concreto (médio)		[35]
A28		0,3	Volume de concreto/ m^2 construído		
B4		R$ 80,00	R$/ t	Valor base em m^3	
A27		R$ 2.172,00	R$/ m2	CUB	[38]
A34	a, b e c	50	anos de vida útil - base		[39]
A34	a	55	anos de vida útil		
A34	b	60	anos de vida útil		
A34	c	70	anos de vida útil		
B7		2,831	$kgCO_2$/ t de agregado natural (média)		[40]
B8		0,761	$kgCO_2$/ t de agregado reciclado (média)		[40]

[34] VASILIU, Leonid et al. Capitalization of tires waste as derived fuel for sustainable cement production. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 56, p. 103104, 1 mar. 2023.
[35] SEVEN RESÍDUOS. CONAMA 499/2020 e Coprocessamento em Cimenteira: Guia Técnico. Disponível em: <https://sevenresiduos.com.br/conama-499-2020-coprocessamento-cimenteira-forno-clinquer/>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[36] IMARC GROUP. GGBFS Price Trend, Chart, Index, Forecast & Trend. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/ground-granulated-blast-furnace-slag-pricing-report?utm_source>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[37] ABNT NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 25 fev. 2022
[38] SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[39] SINDUSCON - SP. *CUB*. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/servicos/cub/>. Acesso em: 24 jul. 2026.
[40] SIDAC. *Busca Produtos*. Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 24 jul. 2026.