



Instituto Superior de Gestão

Mestrado em Estratégia de Investimento e Internacionalização

Descarbonização da Cadeia de Valor da Indústria Cimenteira

Eduardo Manuel Soares Rumor

Lisboa

2025

Eduardo Manuel Soares Rumor

Descarbonização da Cadeia de Valor da Indústria Cimenteira

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Gestão
como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre
em Estratégia de Investimento e Internacionalização

Orientador: Professor Doutor Agostinho da Silva

Lisboa

2025

Agradecimentos

A presente dissertação representa a conclusão de um percurso académico significativo, repleto de desafios e aprendizagens, que só foi possível graças ao apoio e orientação de várias pessoas, às quais expresso o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Doutor Agostinho da Silva, pelo seu apoio ao longo deste trabalho. O seu acompanhamento contínuo e o conhecimento partilhado foram fundamentais para a conclusão desta dissertação.

Gostaria de manifestar o meu agradecimento à Engenheira Cátia Costa, pelo seu apoio e interesse neste estudo, pela informação que partilhou e pela disponibilidade que sempre demonstrou para esclarecer as minhas dúvidas.

Agradeço à minha família, amigos, e colegas da Cimpor pelo apoio constante e pelas palavras de encorajamento ao longo desta jornada. O apoio emocional e a compreensão que sempre demonstraram foram pilares essenciais para a realização deste trabalho.

Por fim, expresso o meu agradecimento ao Instituto Superior de Gestão pela oportunidade de desenvolver este trabalho e pelo bom ambiente proporcionado, bem como a todos os professores que contribuíram para a minha formação, através do conhecimento transmitido e do exemplo profissional que sempre me inspirou.

Resumo

A indústria cimenteira é reconhecida como uma das maiores emissoras globais de dióxido de carbono (CO₂), enfrentando desafios estruturais e operacionais significativos no caminho para a descarbonização. Particular destaque recai sobre as emissões de Âmbito 3, que dizem respeito a fontes indiretas ao longo da cadeia de valor, cuja mitigação se revela especialmente complexa devido à sua dispersão, à multiplicidade de agentes envolvidos e à escassez de controlo direto por parte das empresas produtoras de cimento. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo identificar e analisar estratégias capazes de reduzir substancialmente estas emissões indiretas, contribuindo para um modelo de produção mais sustentável e alinhado com os compromissos climáticos globais.

A investigação foi orientada por três hipóteses centrais, que incidem sobre diferentes eixos de transformação do setor: a implementação de práticas de economia circular, a sensibilização e seleção responsável de fornecedores e a aplicação de tecnologias de Inteligência Artificial (IA). Através de uma metodologia qualitativa, sustentada na análise de casos práticos e em dados secundários, foi possível testar e validar cada uma das hipóteses formuladas.

Os resultados demonstram a viabilidade e o potencial de impacto destas abordagens na redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), com ênfase nas emissões de CO₂ associadas às atividades a montante e a jusante do processo produtivo. A adoção de soluções circulares, o reforço da colaboração ao longo da cadeia de abastecimento e o uso estratégico de tecnologias digitais emergem, assim, como pilares fundamentais para a transição da indústria cimenteira para um modelo mais sustentável, resiliente e competitivo.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria Cimenteira, Âmbito 3, Emissões de CO₂, Estratégias de descarbonização

Abstract

The cement industry is one of the largest global emitters of carbon dioxide (CO₂), facing significant structural and operational challenges in its efforts toward decarbonization. Scope 3 emissions—those indirectly generated along the value chain—are particularly difficult to mitigate due to their diffuse nature, the involvement of multiple stakeholders, and the limited direct control that cement producers exert over them. This study aims to identify and analyze strategic approaches that can substantially reduce these indirect emissions, contributing to a more sustainable production model aligned with global climate commitments.

The research is structured around three central hypotheses, focusing on key transformation drivers within the sector: the implementation of circular economy practices, the awareness and responsible selection of suppliers, and the application of Artificial Intelligence (AI) technologies. A qualitative methodology was adopted, supported by case study analysis and secondary data, allowing for the testing and validation of each proposed hypothesis.

The findings confirm the feasibility and potential impact of these strategies in reducing greenhouse gas (GHG) emissions, particularly CO₂ emissions related to upstream and downstream activities of cement production. The adoption of circular practices, strengthened supplier collaboration, and the strategic use of digital technologies emerge as fundamental pillars for the cement industry's transition toward a more sustainable, resilient, and competitive model.

KEYWORDS: Cement Industry, Scope 3, Carbon Emissions, Decarbonization strategies

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract.....	III
Índice	IV
Lista de acrónimos e abreviaturas.....	VI
1. Introdução	1
2. Problemática	3
2.1. Indústria Cimenteira	3
2.2. Evolução da Produção e Consumo de Cimento.....	6
2.3. Processo de Fabrico de Cimento.....	7
2.4. Emissões de Gases de Efeito de Estufa da Indústria Cimenteira.....	9
3. Questões de Investigação e Objetivos.....	18
4. Revisão de Literatura	21
4.1. Economia Circular	23
4.2. Sensibilização dos Fornecedores	25
4.3. O Papel da Inteligência Artificial na Indústria Cimenteira	26
5. Hipóteses de Investigação.....	28
6. Metodologia	30
7. Teste de Hipóteses	34
7.1. Hipótese 1- Economia Circular	34
7.2. Hipótese 2- Sensibilização dos Fornecedores.....	43
7.3. Hipótese 3- Inteligência artificial	50
8. Discussão de Resultados	57
9. Conclusões	61

9.1. Implicações Práticas e Teóricas.....	63
9.2. Limitações do Estudo e Recomendações para Trabalhos Futuros.....	64
Referências	66

Lista de Figuras

Figura 1- Evolução mundial da produção de cimento 1970-2023 (Fonte: Our World in Data, 2024).....	6
Figura 2- Classificação das emissões segundo o Protocolo GHG (Adaptado de WBCSD,2016).....	9
Figura 3- Fluxo Metodológico da Investigação.....	32

Lista de Tabelas

Tabela 1- Categorias das emissões de Âmbito 3.....	11
Tabela 2- Percentagem de emissões de GEE por Âmbito de empresas do setor cimenteiro.....	14
Tabela 3- Impacto da economia circular nas categorias do Âmbito 3 do setor cimenteiro.....	57
Tabela 4- Impacto da sensibilização dos fornecedores nas categorias do Âmbito 3 do setor cimenteiro.....	59
Tabela 5- Impacto da inteligência artificial nas categorias do Âmbito 3 do setor cimenteiro.....	60

Lista de acrónimos e abreviaturas

CCUS	<i>Carbon Capture Utilisation and Storage</i> (Captura Utilização e Armazenamento de Carbono)
CDRs	Combustíveis Derivados de Resíduos
CO ₂	Dióxido de Carbono
ESG	<i>Environmental, Social, and Governance</i> (Ambiental, social e governação)
GEE	Gases de Efeito Estufa
IA	Inteligência Artificial
NO _x	Óxidos de Azoto
PEE	Pacto Ecológico Europeu
RC&D	Resíduos de construção e demolição
SBTi	<i>Science Based Targets</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre
UE	União Europeia
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>

1. Introdução

As alterações climáticas constituem um dos maiores desafios do século XXI, com impactos significativos em todos os setores da sociedade. A necessidade de mitigar estas mudanças impulsionou a implementação de acordos internacionais, como o Acordo de Paris, que estabelece metas de redução das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) a curto, médio e longo prazo (Franco et al., 2023).

No contexto europeu, a Comissão Europeia, através do Pacto Ecológico Europeu (PEE), reconhece a indústria cimenteira como essencial para a economia da União Europeia (UE), sendo uma componente insubstituível da cadeia de valor de diversos setores, nomeadamente o da construção (European Commission, 2019).

A relevância da sustentabilidade na indústria do cimento tem vindo a crescer, impulsionada pelas alterações climáticas e pela escassez de recursos naturais, dado que este setor é responsável por uma fração significativa das emissões globais de GEE, ocupando atualmente a posição de terceiro maior emissor de dióxido de carbono (CO₂) a nível mundial (Oliveira et al., 2023). Estima-se que a produção de cimento represente cerca de 7% das emissões globais de CO₂, o que coloca esta indústria no centro das discussões sobre sustentabilidade e sobre a transição para uma economia de baixo carbono (Supriya et al., 2023).

Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo investigar de que forma a aplicação de alavancas de economia circular, a sensibilização dos fornecedores e a utilização de inteligência artificial (IA) podem contribuir para a redução das emissões indiretas de GEE na indústria cimenteira. O foco incide sobre as emissões de Âmbito 3, associadas à cadeia de valor, dada a escassez de estudos existentes sobre esta dimensão. Esta lacuna reforça a pertinência da presente investigação, que pretende aprofundar o conhecimento nesta área e propor avanços significativos nesta temática.

Face às crescentes exigências regulatórias e à urgência da redução da pegada de carbono, esta dissertação visa analisar de que modo a indústria cimenteira poderá adotar práticas mais sustentáveis, com vista à neutralidade carbónica na produção de cimento, garantindo simultaneamente a sua competitividade e resiliência num cenário de transição ambiental e económica.

A estrutura da presente dissertação está organizada em nove capítulos, os quais cobrem desde a contextualização e enquadramento do problema até à apresentação das conclusões. Esta organização segue uma lógica progressiva e coerente, conforme se descreve a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o enquadramento geral do tema, destacando a importância da descarbonização da indústria cimenteira e a relevância crescente das emissões de Âmbito 3 no contexto das metas climáticas. É ainda justificada a escolha do tema e descrita a estrutura da dissertação.
- Capítulo 2 – Problemática: Procede-se à caracterização da indústria cimenteira, abordando a sua evolução a nível internacional e nacional, bem como o processo de fabrico do cimento. Analisa-se, ainda, o impacto das suas emissões de GEE.
- Capítulo 3 – Questões de Investigação e Objetivos: Define-se o objetivo principal do estudo, os objetivos específicos e as questões de investigação a que se pretende responder.
- Capítulo 4 – Revisão da Literatura: Apresenta-se o estado da arte sobre a descarbonização da indústria cimenteira, abordando estratégias de mitigação e a sua articulação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com ênfase na economia circular, na sensibilização dos fornecedores e no uso de IA.
- Capítulo 5 – Hipóteses de Investigação: Descrição das hipóteses
- Capítulo 6 – Metodologia de Investigação: Descrevem-se os métodos de recolha de dados utilizados, bem como as considerações éticas que orientaram a investigação.
- Capítulo 7 – Teste das Hipóteses: Apresentam-se os resultados obtidos com o teste das três hipóteses formuladas, correspondentes a três áreas estratégicas: H1 – Economia Circular; H2 – Sensibilização dos Fornecedores; H3 – Inteligência Artificial. Cada hipótese é analisada individualmente com base nos dados recolhidos.
- Capítulo 8 – Discussão de Resultados: Analisa-se criticamente os resultados, organizados em torno das três hipóteses, destacando os fatores de maior e menor relevância e as suas implicações práticas.
- Capítulo 9 – Conclusões: São apresentadas as principais implicações práticas e teóricas do estudo, as limitações identificadas e sugestões para futuras investigações.

2. Problemática

As alterações climáticas constituem atualmente um dos maiores desafios à escala global, cujos efeitos já são amplamente visíveis. O aumento da frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos extremos, a escassez de recursos hídricos, a subida do nível médio do mar e a perda de biodiversidade são apenas alguns dos impactos sentidos. A principal causa deste fenómeno reside na emissão de GEE para a atmosfera, resultante, sobretudo, da atividade humana, incluindo a queima de combustíveis fósseis, os processos industriais e a desflorestação (Franco et al., 2023). Os GEE são substâncias que retêm o calor na atmosfera, intensificando o efeito de estufa natural e provocando o aquecimento global, o qual está diretamente associado às alterações climáticas (Anquetin et al., 2022).

Como resposta a esta problemática, foi assinado em 2015 o Acordo de Paris, no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas. Este acordo compromete os países signatários a limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais. Para cumprir este objetivo, cada país deve apresentar planos de ação climática com metas claras de redução de emissões até 2030, bem como definir estratégias que conduzam à neutralidade carbónica até 2050. Esta meta pressupõe a mitigação das emissões de GEE, ou, em alternativa, que as emissões sejam compensadas através de mecanismos de remoção, captura ou compensação de CO₂ por meio de ações ambientais (Schmidt et al., 2021).

Em Portugal, a concretização dos compromissos assumidos no Acordo de Paris tem sido operacionalizada através de políticas e instrumentos nacionais, com destaque para o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030). Este plano estabelece as principais metas nacionais em matéria de energia e clima para a próxima década, incluindo, entre outros objetivos, a redução de, pelo menos, 55% das emissões de GEE até 2030, o aumento da quota de energias renováveis no consumo final de energia, bem como a melhoria significativa da eficiência energética (ATIC, 2019).

2.1. Indústria Cimenteira

O cimento é o material de construção mais utilizado no mundo, desempenhando um papel essencial tanto no desenvolvimento de infraestruturas como na construção civil (Ige et al., 2024). Assim, a indústria cimenteira assume um papel fundamental na economia global, não apenas pelo seu contributo direto na construção, mas também pela criação de emprego e pelo estímulo ao

crescimento económico (Lim et al., 2020). Impulsionada pela crescente urbanização, a procura por cimento tem vindo a aumentar de forma exponencial. Desde 1950, a produção mundial triplicou, registando um crescimento quatro vezes superior ao verificado em 1990 (Caracitas, 2022).

O impacto económico desta indústria é amplificado pela sua importância estratégica no investimento em infraestruturas, especialmente em países em desenvolvimento, onde a expansão urbana e o crescimento das infraestruturas exigem grandes volumes de materiais de construção (Rodrigues & Veríssimo, 2021). Os projetos de construção de grande escala são conhecidos pelo seu efeito multiplicador, tanto em termos de relevância como de retorno económico, o que demonstra que a indústria cimenteira não só contribui para a modernização das infraestruturas, como também para a revitalização económica, promovendo o crescimento de setores correlacionados e criando oportunidades sustentadas a longo prazo (ATIC, 2019).

Atualmente, a indústria cimenteira enfrenta diversos desafios no sentido de responder às exigências crescentes de eficiência, sustentabilidade e competitividade global. Perante a necessidade de equilibrar a produção com as preocupações ambientais, as empresas do setor assumem um papel decisivo na promoção de um futuro mais sustentável (Sanjuán, 2020).

A Cembureau, Associação Europeia do Cimento, tem desempenhado um papel de destaque na orientação da indústria cimenteira europeia no caminho da neutralidade carbónica, alinhando os esforços do setor com os objetivos climáticos da UE. Através da elaboração de roteiros estratégicos e da definição de cenários de transição, esta organização tem promovido uma abordagem coordenada e progressiva com vista à neutralidade carbónica até 2050 (Turakulov et al., 2023).

Em 2020, a Cembureau publicou o seu principal instrumento estratégico, intitulado *Cementing the European Green Deal – The European Cement Industry's Ambition for 2050*. Este roteiro apresenta uma visão abrangente da trajetória de descarbonização do setor, estruturada por marcos temporais distintos e cenários que refletem diferentes níveis de ambição climática. A abordagem contempla três metas principais: curto prazo (até 2030), médio prazo (até 2040) e o objetivo final de alcançar a neutralidade carbónica até 2050 (Cembureau, 2020).

O documento define dois cenários distintos. O primeiro, de referência, prevê uma redução significativa das emissões de carbono com base nas tecnologias e políticas atualmente disponíveis. O segundo, de carácter mais ambicioso, antecipa a neutralidade total do setor até 2050, com base em avanços substanciais na inovação tecnológica, infraestrutura e apoio político. Estes cenários

não se limitam à definição de metas quantitativas; constituem também ferramentas de planeamento e apoio à decisão, permitindo a empresas e decisores políticos avaliar as condições e medidas necessárias para cada trajetória (Cembureau, 2020).

A atuação da Cembureau tem sido essencial para fomentar a colaboração entre os diversos agentes do setor, desde os produtores de cimento até aos centros de investigação e entidades públicas, o que tem contribuído para consolidar uma visão comum e promover iniciativas conjuntas fundamentais para acelerar a transição rumo à neutralidade carbónica (Turakulov et al., 2023).

Complementarmente ao trabalho desenvolvido a nível europeu, também a nível nacional têm sido definidos roteiros estratégicos que adaptam os objetivos globais à realidade local. Em Portugal, esta transição tem sido liderada pela ATIC, Associação Técnica Da Indústria De Cimento, que elaborou o *Roteiro da Indústria Cimenteira para a Neutralidade Carbónica 2050*, em articulação com as metas do Plano Nacional Energia e Clima (PNEC) e com a Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica (ELP). Este roteiro adapta os princípios da Cembureau ao contexto português, tendo em conta os recursos disponíveis, a estrutura industrial e as especificidades do enquadramento regulatório nacional (ATIC, 2019).

Tal como o roteiro europeu, o plano nacional define marcos temporais até 2030, 2040 e 2050, e contempla diferentes caminhos possíveis para a transição climática, integrando variáveis como a evolução tecnológica, os custos de investimento e o papel do Estado enquanto facilitador da inovação e da descarbonização.

Os desafios associados à redução da pegada ecológica da produção de cimento e ao cumprimento das exigências ambientais requerem investimentos significativos e inovação tecnológica. No entanto, representam também oportunidades estratégicas para a adoção de práticas mais sustentáveis, posicionando a indústria cimenteira como um setor-chave na transformação do futuro da construção (Poudyal & Adhikari, 2021).

A crescente pressão do mercado e das regulamentações ambientais está a moldar uma nova era para a indústria cimenteira, onde a sustentabilidade deixa de ser apenas uma obrigação ética para se tornar uma exigência de competitividade. As empresas que não conseguirem adaptar-se a esta nova realidade correm o risco de perder relevância no mercado, enquanto aquelas que apostarem na inovação e na sustentabilidade estarão mais bem posicionadas para se destacar.

2.2. Evolução da Produção e Consumo de Cimento

A crescente exigência pela adoção de processos de fabricação mais sustentáveis e o desenvolvimento de cimentos compostos que incorporem materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes e escórias, têm contribuído para a redução da pegada de carbono do cimento, com impacto positivo na evolução do setor. Os avanços tecnológicos recentes têm também impulsionado o desenvolvimento de novas formulações, mais especializadas e adaptadas às exigências da construção moderna (Imarc, 2024).

A produção e o consumo de cimento, em termos globais, têm registado uma evolução exponencial. Em 1995, a produção rondava os 1,39 mil milhões de toneladas, enquanto, em 2024, atingiu cerca de 4,1 mil milhões de toneladas. A Figura 1 ilustra esse crescimento acentuado, evidenciando um pico em torno dos 4 mil milhões de toneladas produzidas (Cembureau, 2024; Our World in Data, 2024). Este aumento foi impulsionado, sobretudo, pela expansão acelerada de infraestruturas e pela urbanização em países em desenvolvimento. Contudo, observa-se um abrandamento nos últimos anos, motivado pela implementação de políticas de contenção nos setores imobiliário e da construção, bem como por novas restrições ambientais (Caracitas, 2022).

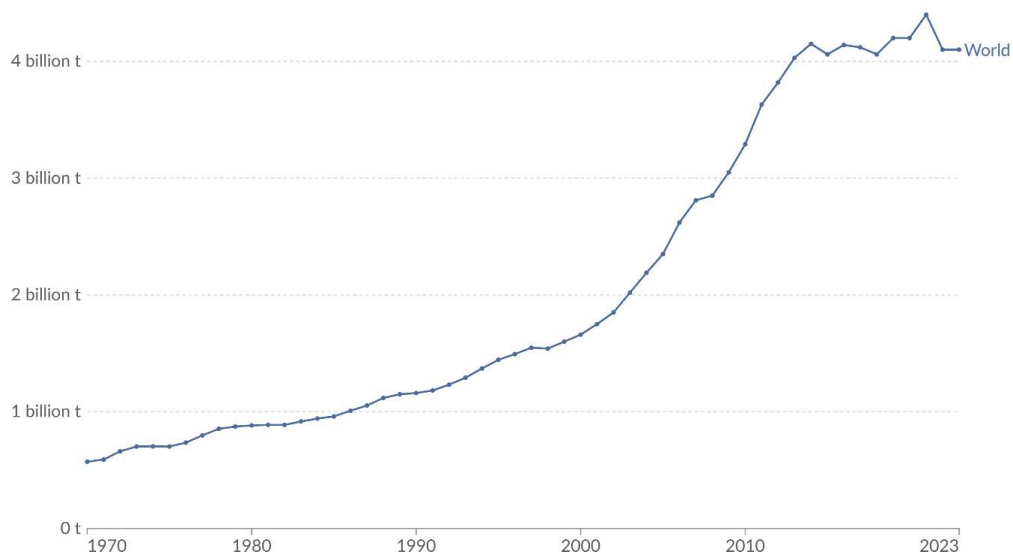


Figura 1- Evolução mundial da produção de cimento 1970-2023 (Fonte: Our World in Data, 2024)

Em 2024, a China liderava a produção mundial de cimento, com cerca de 2,1 mil milhões de toneladas, o que representa aproximadamente 50% da produção global. Seguem-se a Índia (370 milhões de toneladas), o Vietname (120 milhões de toneladas) e os Estados Unidos da América (95 milhões de toneladas) (World Population Review, 2024). Nesse ano, o mercado global do

cimento foi avaliado em 407,4 mil milhões de dólares, sendo estimado que atinja os 629,9 mil milhões de dólares até 2033, com uma taxa de crescimento anual composta de 5,16% (Imarc, 2024).

No que respeita ao consumo, este acompanha de perto a tendência da produção, com variações regionais significativas. Regiões como África e Ásia continuam a registar uma procura elevada, motivada pela necessidade de novas infraestruturas. Em contrapartida, regiões mais desenvolvidas, como a Europa e a América do Norte, apresentam consumos mais moderados, orientados para modelos de construção mais sustentáveis (World Cement Association, 2024).

A nível nacional, a produção de cimento em Portugal, em 2024, foi de cerca de 5,2 milhões de toneladas (Cimpor, 2024; Secil, 2024). A produção nacional teve início em 1894, com a inauguração da primeira fábrica portuguesa, a Fábrica Tejo, atualmente designada Centro de Produção de Alhandra, localizada na vila de Alhandra e pertencente ao Grupo Cimpor (Cimpor, 2025). Atualmente, o setor cimenteiro português é composto por duas principais empresas: Cimpor e Secil (ATIC, 2019). No que diz respeito ao consumo nacional, este totalizou cerca de 4,1 milhões de toneladas em 2024, o que representa um crescimento de 4,3% face a 2023 (AICCOPN, 2025).

2.3. Processo de Fabrico de Cimento

O processo produtivo do cimento é complexo, altamente técnico e composto por diversas fases interdependentes, que se estendem desde a extração das matérias-primas até à expedição do produto final. Trata-se de um ciclo industrial intensivo em energia e recursos, com forte impacto ambiental, o que justifica a crescente atenção à sua eficiência e sustentabilidade.

O ciclo tem início na pedreira, onde se realiza a extração das matérias-primas essenciais à produção do cimento. A principal matéria-prima é o calcário, cuja extração é feita por perfuração e desmorte com recurso a explosivos industriais. Esta operação dá origem a blocos de grandes dimensões, os quais são submetidos a um processo de britagem primária, com o objetivo de reduzir o seu tamanho para facilitar o manuseamento e o processamento subsequente (Cimpor, 2025).

Segue-se a fase de pré-homogeneização, etapa crítica para garantir a uniformidade da composição química do produto final. Os materiais britados são depositados em camadas longitudinais, formando pilhas com capacidades que podem variar entre 10 a 30 mil toneladas. Neste ponto, são também adicionados materiais corretivos, como a areia (sílica), a bauxite (alumina) e a marga (argila calcária), com o intuito de ajustar a composição química da mistura de

acordo com os parâmetros desejados. A mistura é então retomada de forma transversal, promovendo a homogeneização dos componentes e reduzindo as variações químicas, o que é essencial para a qualidade do clínquer (Thermo Fisher Scientific, 2024).

Posteriormente, o material segue para a moagem crua, onde é processado em moinhos de bolas ou moinhos verticais, resultando numa mistura finamente moída conhecida como farinha crua. Esta farinha é armazenada em silos de homogeneização, nos quais é continuamente agitada para garantir a estabilidade e consistência da sua composição antes de seguir para o forno (Caracitas, 2022).

A fase seguinte é a clinquerização, considerada o coração do processo de fabrico do cimento. Nesta etapa, a farinha crua é alimentada num forno rotativo e submetida a temperaturas extremamente elevadas, na ordem dos 1450 °C. Para alcançar e manter estas temperaturas, são utilizados combustíveis fósseis, como o *petcoke* (subproduto do refino do petróleo), bem como combustíveis alternativos, incluindo resíduos industriais não perigosos e biomassa. Sob estas condições térmicas, os compostos da farinha reagem quimicamente, dando origem ao clínquer, que se apresenta sob a forma de pequenos nódulos de cor cinza-escura, os quais constituem a base do cimento (Secil, 2024).

Após a formação, o clínquer é submetido a um processo de arrefecimento rápido, fundamental para preservar as suas propriedades físico-químicas. Uma vez arrefecido, é armazenado em silos próprios até ser encaminhado para a etapa seguinte (Caracitas, 2022).

Na fase de moagem final, o clínquer é combinado com pequenas quantidades de gesso, que tem a função de regular o tempo de presa do cimento, e com outros aditivos minerais, como filler calcário, cinzas volantes, escórias de alto-forno ou pozolanas naturais, consoante o tipo de cimento a ser produzido. A proporção de cada componente é cuidadosamente ajustada para cumprir as especificações técnicas e normas aplicáveis a cada tipo de cimento (Thermo Fisher Scientific, 2024).

O produto final é então armazenado em silos de cimento, de onde pode ser ensacado (em sacos de diferentes formatos e volumes), paletizado, embalado em pacotões, ou expedido a granel, dependendo do perfil do cliente e das condições logísticas (Caracitas, 2022).

A etapa final do processo é a expedição, que pode ocorrer por via terrestre (camiões e comboios), marítima (navios, nos terminais portuários adjacentes às unidades de produção) ou

ferroviária, garantindo assim a distribuição do produto aos mercados nacionais e internacionais (Cimpor, 2025).

Este processo, apesar de altamente industrializado, está sujeito a constante inovação, sobretudo no que diz respeito à eficiência energética, ao controlo de emissões e à introdução de matérias-primas alternativas, representando um campo estratégico para a descarbonização da indústria cimenteira.

2.4. Emissões de Gases de Efeito de Estufa da Indústria Cimenteira

No âmbito das emissões de GEE, o Protocolo GHG, uma iniciativa conjunta do *World Resources Institute* (WRI) e do *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), fornece uma base metodológica globalmente reconhecida para a quantificação e comunicação das emissões. Este protocolo estabelece a distinção entre emissões diretas e emissões indiretas. As primeiras dizem respeito às emissões que ocorrem diretamente nas instalações da organização, como resultado das suas operações. As segundas referem-se às emissões que, embora não ocorram diretamente na empresa, estão associadas às suas atividades ao longo da cadeia de valor.

O Protocolo GHG categoriza as emissões de GEE em três Âmbitos: Âmbito 1, Âmbito 2 e Âmbito 3, conforme ilustrado na Figura 2 (Kasperzak et al., 2023).

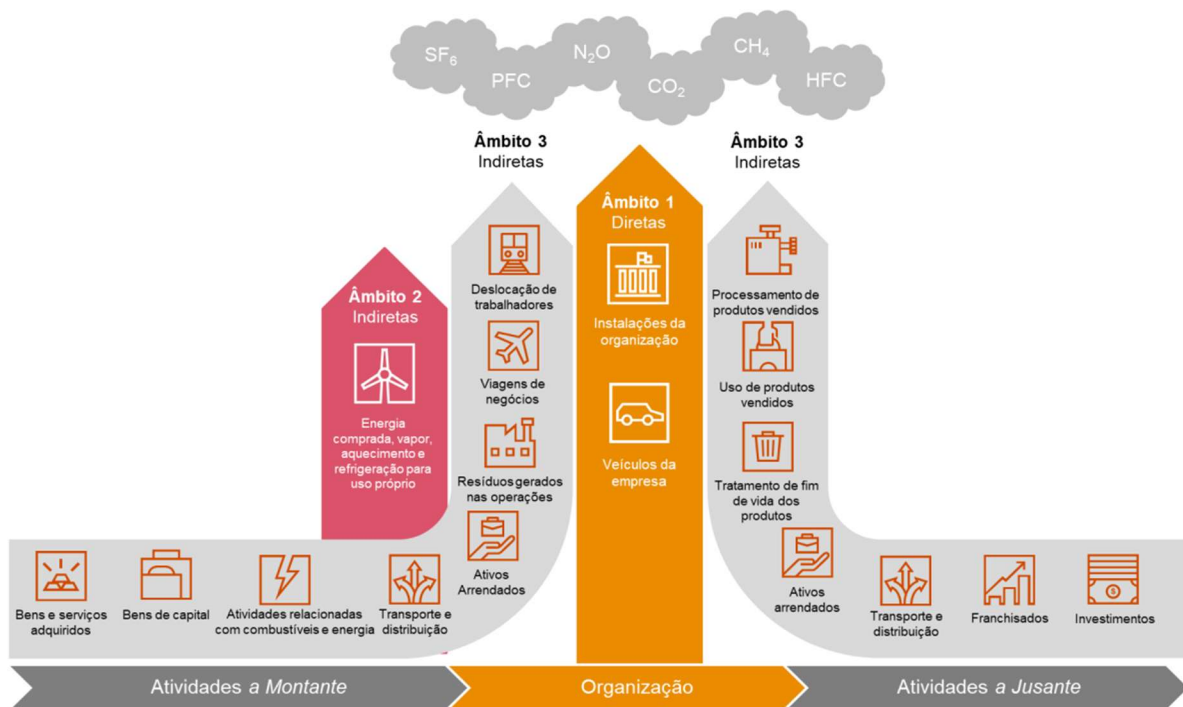


Figura 2- Classificação das emissões segundo o Protocolo GHG (Adaptado de WBCSD, 2016)

O Âmbito 1 refere-se às emissões diretas provenientes de fontes controladas pela organização. Na indústria cimenteira, estas emissões provêm, em grande parte, do processo de clínquerização, especialmente da queima de combustíveis fósseis nos fornos e da reação química da calcinação do calcário ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), que liberta grandes quantidades de CO_2 . Estes fornos, além do CO_2 , emitem também outros poluentes atmosféricos relevantes, como óxidos de azoto (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e partículas finas (Cavalett et al., 2024; Rocha & Cardeira, 2021). Estima-se que cerca de 60% das emissões de Âmbito 1 provenham do processo químico da clínquerização e os restantes 40% da combustão de combustíveis fósseis (Santos, 2024).

O Âmbito 2 abrange as emissões indiretas associadas à compra de energia (eletricidade, calor ou vapor). Embora não sejam geradas nas instalações da empresa, resultam do consumo de energia fornecida por terceiros, cuja produção pode envolver fontes poluentes. Na indústria cimenteira, este tipo de emissão está especialmente presente em processos com elevada intensidade elétrica, como a moagem de matérias-primas e clínquer, além de outros consumos elétricos industriais (WBCSD, 2016).

O Âmbito 3 compreende todas as outras emissões indiretas associadas à cadeia de valor — tanto a montante (ex. aquisição de matérias-primas, transporte, bens de capital) como a jusante (ex. distribuição, utilização e fim de vida dos produtos). Estas emissões são as mais difíceis de quantificar e controlar, por dependerem de terceiros e de variáveis externas à organização (Jain, 2023).

Dentro do Âmbito 3, as emissões indiretas de GEE estão divididas em 15 categorias, descritas na Tabela 1 (WBCSD, 2016; Li et al., 2019; Jain, 2023; Normative, 2024).

Tabela 1- Categorias das emissões de Âmbito 3

Emissões Âmbito 3		
Categoria	Descrição da categoria	Principais causas na indústria cimenteira
Atividades a Montante		
Categoria 1- Bens e serviços adquiridos	Emissões associadas à extração e/ou produção de bens e serviços adquiridos pela empresa, tais como equipamentos, máquinas ou serviços de manutenção e logística, não incluídos nas categorias 2 e 8.	Emissões relacionadas com extração e/ou produção de matérias-primas utilizadas na produção de clínquer (ex. calcário, areia e outras matérias-primas corretivas), de adições utilizadas na formulação do cimento (ex. calcário, argilas, cinzas e gesso) e aquisição de serviços de manutenção, bem como de partes de equipamentos.
Categoria 2- Bens de capital	Emissões resultantes da extração e/ou produção de bens de capital utilizados pela empresa nas suas operações, nomeadamente, infraestruturas, maquinaria industrial e veículos.	Emissões relacionadas com a produção dos fornos, moinhos e silos, dos veículos operacionais e equipamento informático.
Categoria 3- Atividades relacionadas com combustíveis e energia	Emissões geradas na extração, produção e transporte de combustíveis e energia adquiridos pela empresa, não contabilizados no Âmbito 1 ou 2.	Emissões estão associadas à extração, produção e transporte dos combustíveis fósseis (e.g. carvão, <i>petcoke</i> e fuel óleo) e/ou alternativos (CDRs (Combustíveis Derivados de Resíduos), chips de pneus, biomassa) e perdas de distribuição e transmissão de eletricidade.
Categoria 4- Transporte e distribuição	Emissões relacionadas com o transporte das matérias-primas.	Emissões associadas ao transporte da matéria-prima e aditivos desde a origem (fornecedor) até à fábrica, como o transporte de clínquer e calcário.

Categoria 5- Resíduos gerados nas operações	Emissões associadas ao tratamento de resíduos gerados nas operações da empresa.	Emissões associadas ao tratamento e transporte de resíduos gerados, como resíduos de embalagem, resíduos de equipamento eletrônico, resíduos de construção e demolição, por tipo de destino (aterro, reciclagem etc.).
Categoria 6- Viagens de negócios	Transporte de funcionários para atividades relacionadas com a empresa (em veículos não pertencentes ou operados pela empresa declarante).	Todas as viagens de negócios.
Categoria 7- Deslocação de trabalhadores	Emissões relacionadas ao transporte dos colaboradores de casa até ao local de trabalho, em veículos privados ou transporte público.	Todas as deslocações pendulares dos funcionários de ou para casa/escritórios.
Categoria 8- Ativos arrendados	Emissões da operação de ativos arrendados pela empresa, como veículos e equipamentos de tecnologia.	Todas as emissões dos Âmbitos 1 e 2 resultantes da exploração do ativo alugado (veículos, fábricas, equipamentos informáticos, etc).
Atividades a Jusante		
Categoria 9- Transporte e distribuição	Emissões associadas ao transporte e distribuição de produtos da empresa após a venda.	Emissões associadas à distribuição de clínquer e/ou cimento ensacado e/ou a granel para os clientes.
Categoria 10- Processamento de produtos vendidos	Emissões geradas pelo processamento de produtos vendidos pela empresa.	Emissões associadas à fabricação de betão ou outros tipos de produtos utilizando o cimento vendido.
Categoria 11- Uso de produtos vendidos	Emissões geradas pelo uso dos produtos pela base de clientes.	Emissões associadas à carbonatação do betão durante o período de vida útil.

Categoria 12- Tratamento de fim de vida dos produtos	Emissões geradas pela disposição final dos produtos, como reciclagem ou aterros. Eliminação e tratamento de resíduos de produtos vendidos pela empresa declarante (no ano de referência) no final da sua vida útil.	Emissões associadas à disposição de clínquer, cimento e/ou betão em fim de vida.
Categoria 13- Ativos arrendados	Operação de ativos detidos pela empresa (locador) e arrendados a outras entidades no ano de relato não incluídos nos Âmbitos 1 e 2.	Quando aplicável, todas as emissões dos Âmbitos 1 e 2 resultantes da exploração do ativo alugado (veículo, instalação, equipamento informático, etc.)
Categoria 14- Franchisados	Emissões das operações de franquias, como as emissões associadas às operações realizadas pelas unidades franqueadas, incluindo consumo de energia, transporte e demais atividades inerentes ao funcionamento destas operações.	Esta categoria não é relevante para o setor cimenteiro.
Categoria 15- Investimentos	Emissões referentes aos ativos financeiros e os investimentos realizados pela empresa, contemplando as emissões geradas por estas participações, como em projetos de infraestrutura ou outras iniciativas.	Esta categoria não é relevante para o setor cimenteiro.

A Tabela 2 apresenta a percentagem de emissões de GEE por Âmbito em empresas nacionais e internacionais do setor cimenteiro, incluindo uma análise mais pormenorizada das categorias do Âmbito 3.

Tabela 2- Percentagem de emissões de GEE por Âmbito de empresas do setor cimenteiro

Empresa	Holcim	Heidelberg	Cemex	Taiwan Cement Corporation	Cimpor	Secil
Âmbito 1	60.9%	70%	63%	93%	80%	69%
Âmbito 2	3.6%	5%	6%		4%	3%
Âmbito 3	35.5%	25%	31%	7%	16%	28%
Categoria 1	17.6%	34.6%	35.8%	25.0%	-	-
Categoria 2	0.4%	-	1.2%	8.9%	-	-
Categoria 3	11.3%	16.2%	14.6%	21.4%	-	-
Categoria 4	9.3%	15.4%	12.1%	14.3%	-	-
Categoria 5	0.2%	-	-	-	-	-
Categoria 6	-	-	0.1%	-	-	-
Categoria 7	0.2%	-	0.4%	-	-	-
Categoria 8	0.2%	-	-	-	-	-
Categoria 9	4.7%	-	3.6%	12.5%	-	-
Categoria 10	4.0%	0.9%	0.6%	5.4%	-	-
Categoria 11	-	-	21.8%	-	-	-
Categoria 12	3.0%	-	3.6%	12.5%	-	-
Categoria 13	-	-	-	-	-	-
Categoria 14	-	-	-	-	-	-
Categoria 15	49.0%	32.9%	6.1%	-	-	-

O Âmbito 1 é o mais significativo para todas as empresas analisadas, o que evidencia a natureza intensiva em carbono da produção de cimento. Este âmbito reflete diretamente as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis e dos processos químicos envolvidos na produção de clínquer. Em contraste, o Âmbito 2 representa uma parcela menor, variando entre 3% e 6% nas diferentes empresas, o que sugere uma dependência relativamente reduzida de fontes externas de energia elétrica, quando comparado com as emissões diretas.

O Âmbito 3 apresenta uma variabilidade significativa, com especial destaque para as categorias 1, 3, 4 e 15. No entanto, muitas empresas ainda não reportam de forma abrangente as

emissões deste âmbito, sobretudo em determinadas categorias. Esta lacuna compromete a comparabilidade entre empresas e evidencia a necessidade de maior transparência e maturidade nos sistemas de reporte ambiental. A adoção de práticas de reporte mais rigorosas e completas é, por isso, essencial para melhorar a precisão e a comparabilidade dos dados de emissões neste setor.

A transição para uma indústria neutra em carbono constitui o principal objetivo das cimenteiras até 2050. Neste contexto, surge o conceito de descarbonização, entendido como a redução significativa das emissões de GEE, com particular enfoque no CO₂ (Poudyal & Adhikari, 2021).

No que respeita aos Âmbitos 1 e 2, a descarbonização da indústria cimenteira tem registado avanços importantes, já contando com planos estratégicos bem definidos. Contudo, o Âmbito 3 permanece numa fase embrionária de estudo e implementação. Representa um desafio acrescido para a indústria, uma vez que depende de colaboração intersectorial e da reconfiguração de práticas logísticas e de fornecimento. O setor tem, por isso, vindo a explorar soluções inovadoras e a desenvolver alavancas específicas para mitigar estas emissões (Miller et al., 2021).

No que diz respeito ao Âmbito 1, têm sido desenvolvidas diversas medidas e tecnologias com vista à redução das emissões, nomeadamente:

- Utilização de matérias-primas alternativas, especialmente descarbonatadas – Dada a relevância estratégica dos recursos naturais, as cimenteiras têm vindo a incorporar materiais alternativos provenientes de outras indústrias, como subprodutos industriais (cinzas de cinzeiro, escórias e RC&D (resíduos de construção e demolição)) (Cimpor, 2024);
- Substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos com elevada fração de biomassa – Incluindo resíduos urbanos e industriais como CDRs, pneus usados, resíduos de veículos em fim de vida, farinha animal, estilha de madeira e bagaço de azeitona (Longo, 2023);
- Redução da taxa de incorporação de clínquer no cimento – Através da promoção de cimentos compostos com maior teor de adições (materiais cimentícios suplementares), contribuindo para a redução do consumo de clínquer, e consequentemente o consumo de matérias-primas virgens (Cimpor, 2024);
- Adoção de tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) – Permite capturar o CO₂ emitido nos fornos ou diretamente da atmosfera, armazenando-o

geologicamente ou reutilizando-o em processos industriais, como a produção de combustíveis sintéticos ou materiais de construção (Jiang et al., 2024; Oguntola & Simske, 2023).

Para o Âmbito 2, têm sido promovidas ações com vista à redução do consumo e à transição energética, nomeadamente:

- Melhoria da eficiência energética térmica, através da modernização dos fornos e da digitalização dos processos, criando instalações mais interligadas e eficientes (Antunes et al., 2022);
- Melhoria da eficiência energética elétrica, com a atualização de equipamentos e o aumento da utilização de eletricidade proveniente de fontes renováveis, como a instalação de painéis solares, turbinas eólicas e sistemas de recuperação de calor residual (Oliveira et al., 2023);
- Instalação de sistemas de armazenamento de energia em grande escala, como baterias, para garantir o aproveitamento pleno da energia renovável e assegurar fornecimento contínuo, mesmo em períodos de baixa produção (Cimpor, 2024);
- Eletrificação de processos de clínquerização e de calcinação de argilas, com desenvolvimento de novos tipos de clínquer e cimentos compatíveis com esta mudança (Oliveira et al., 2023).

No que se refere ao Âmbito 3, a sustentabilidade foi alargada a toda a cadeia de abastecimento, surgindo novas práticas e estratégias:

- Colaboração estreita com parceiros de negócio, promovendo a seleção de fornecedores com menor pegada de carbono e incentivando práticas sustentáveis conjuntas (Clauwaert et al., 2023);
- Contratos públicos de fornecimento de energia renovável, que estimulem os fornecedores a adotar fontes de energia limpa (Hettler & Graf-Vlachy, 2024);
- Otimização logística dos transportes, com recurso a IA, planeamento de rotas eficientes, utilização de veículos elétricos ou ferroviários, e eletrificação de equipamentos industriais (Yosef et al., 2023);
- Sensibilização e envolvimento dos colaboradores, através de formação em sustentabilidade, incentivo ao uso de transportes sustentáveis e promoção de medidas de eficiência energética (Hettler & Graf-Vlachy, 2024).

Historicamente, a produção de cimento esteve orientada para a maximização de volume e minimização de custos, mas essa abordagem tornou-se insustentável num contexto de crescente exigência ambiental. O foco atual já não está em produzir mais, mas em produzir melhor, minimizando o impacto ecológico e alinhando a atividade industrial com os compromissos globais de descarbonização.

Neste sentido, a descarbonização da indústria do cimento exige uma abordagem integrada e multidimensional, que articule inovação tecnológica, transformação operacional e reformas institucionais. Só através desta convergência será possível reduzir substancialmente as emissões do setor, garantir a sua competitividade e contribuir de forma concreta para o combate às alterações climáticas.

Deste quadro decorre o problema central desta investigação: os desafios enfrentados pelo setor cimenteiro perante a crescente exigência por sustentabilidade. O principal obstáculo reside na necessidade de alterar comportamentos de mercado e fomentar a consciencialização ambiental. O futuro do setor dependerá da sua capacidade de transformar os processos produtivos e alinhar-se com exigências ambientais cada vez mais rigorosas.

Resulta da Tabela 2 que as emissões de Âmbito 1 e 2 continuam a representar a maioria das emissões do setor, sendo estes domínios já amplamente estudados e alvo de estratégias claras de mitigação. Já no caso do Âmbito 3, embora represente uma fração menor, ainda existem poucos avanços significativos, sendo evidente a necessidade de maior desenvolvimento e implementação de medidas para a sua redução.

3. Questões de Investigação e Objetivos

Perante a crescente exigência de descarbonização no setor industrial, este estudo pretende aprofundar as oportunidades e os desafios enfrentados pelas empresas cimenteiras na sua transição para um modelo de produção mais sustentável. Através da identificação e análise de estratégias eficazes, procura-se contribuir para o desenvolvimento de medidas inovadoras que promovam a sustentabilidade na indústria do cimento.

Com base na problemática anteriormente descrita, foram formuladas as seguintes questões de investigação:

A indústria cimenteira é reconhecida como uma das principais emissoras de CO₂, desempenhando um papel relevante no agravamento das alterações climáticas. Esta elevada intensidade carbónica decorre não apenas da queima de combustíveis fósseis no processo produtivo, mas também das reações químicas inerentes à produção do clínquer. Além disso, a extração de matérias-primas virgens, como o calcário, exerce uma pressão acrescida sobre os recursos naturais e agrava a pegada ambiental do setor.

Num cenário que exige a redução das emissões de GEE, torna-se imperativo que a indústria aumente o uso de matérias-primas recicladas, o que pode contribuir, simultaneamente, para a mitigação das emissões de Âmbito 3. Este desafio adquire ainda maior relevância perante a escassez crescente de recursos naturais e a intensificação das exigências regulamentares. Neste enquadramento, a adoção de práticas de economia circular surge como uma via estratégica promissora, originando a primeira questão de investigação:

Q1) Como pode a indústria cimenteira intensificar a incorporação de matérias-primas recicladas?

O objetivo desta questão é identificar medidas que permitam à indústria reduzir a sua dependência de materiais virgens, nomeadamente através da aplicação de princípios de economia circular. Pretende-se explorar estratégias que incentivem a substituição de matérias-primas naturais por recicladas ou alternativas, bem como a valorização de resíduos e subprodutos industriais.

Além da gestão interna, torna-se essencial uma abordagem holística e articulada, que envolva todos os intervenientes ao longo da cadeia de valor. Neste contexto, a seleção criteriosa de fornecedores e a sua capacitação para práticas sustentáveis assumem um papel fundamental.

Este alinhamento estratégico entre empresas cimenteiras e os seus fornecedores pode potenciar não só a redução efetiva das emissões de Âmbito 3, como também promover a

transparência e a rastreabilidade dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos. Adicionalmente, responde às exigências crescentes de reguladores, investidores e consumidores no que respeita à responsabilidade ambiental e à sustentabilidade das cadeias de valor industriais. Surge assim a segunda questão de investigação:

Q2) Como a seleção e sensibilização de fornecedores contribui para a redução das emissões do Âmbito 3 na indústria cimenteira?

O objetivo desta questão é compreender de que forma a adoção de critérios ambientais nos processos de seleção e monitorização de fornecedores pode contribuir para a sustentabilidade da cadeia de valor. Pretende-se ainda identificar oportunidades relacionadas com práticas responsáveis, uso de matérias-primas sustentáveis e eficiência logística, enquanto instrumentos para a redução das emissões indiretas do setor.

No atual contexto, a inovação tecnológica revela-se uma alavanca crítica na redução das emissões de Âmbito 3. A incorporação de processos produtivos mais eficientes, a digitalização da cadeia de abastecimento e a automatização da gestão logística são exemplos de soluções que podem contribuir de forma significativa para a descarbonização da indústria do cimento. Deste modo, é formulada a terceira questão de investigação:

Q3) Pode a indústria do cimento inovar de forma a reduzir as emissões de Âmbito 3?

O objetivo desta questão é investigar como a indústria cimenteira pode impulsionar a inovação tecnológica, com especial foco na adoção de soluções baseadas em IA. Pretende-se analisar o potencial da IA na monitorização, previsão e otimização de processos ao longo da cadeia de valor, na identificação de ineficiências, na melhoria da rastreabilidade das emissões indiretas e no apoio à tomada de decisões estratégicas sustentáveis.

Este estudo tem como objetivo principal avaliar medidas inovadoras que promovam a descarbonização da cadeia de valor associada ao processo de produção de cimento. A investigação foca-se nas práticas de economia circular, na sensibilização dos fornecedores e na utilização de IA por parte das empresas do setor, tendo em vista a redução das emissões de CO₂ ao longo de toda a cadeia.

Para tal, propõe-se a construção de um modelo empírico assente numa metodologia qualitativa, recorrendo ao modelo hipotético-dedutivo. São definidos como objetivos específicos deste estudo:

i) Analisar os principais desafios enfrentados pela indústria cimenteira na sua transição para a neutralidade carbônica; ii) Compreender de que forma a indústria pode reduzir as suas emissões de CO₂ ao longo da cadeia de valor; iii) Formular e testar hipóteses que validem ou rejeitem as alavancas estudadas, com base em casos práticos referenciados na literatura especializada.

4. Revisão de Literatura

A crescente consciencialização relativamente à necessidade de mitigar as alterações climáticas tem orientado os esforços de investigação para o desenvolvimento de tecnologias economicamente viáveis de redução das emissões de GEE (Clauwaert et al., 2023).

Nos Âmbitos 1 e 2, a adoção de estratégias inovadoras, bem como a criação de normas e obrigações regulatórias que incentivem a sustentabilidade nas atividades industriais, têm assumido um papel central numa transição ecológica eficaz. Do ponto de vista tecnológico, diversas abordagens têm vindo a ser implementadas com o intuito de mitigar as emissões. Melhorias na eficiência energética dos processos oferecem um primeiro nível de intervenção, com vantagens associadas à sua rápida aplicabilidade em instalações existentes, embora os ganhos absolutos sejam limitados. De maior impacto tem sido a substituição de combustíveis fósseis por alternativas com menor intensidade carbónica, como resíduos industriais e combustíveis alternativos. Estas soluções possibilitam reduções significativas nas emissões diretas, embora apresentem limitações relacionadas com a disponibilidade regional, custos logísticos e compatibilidade técnica com os equipamentos existentes (IEA, 2023).

Outro eixo de intervenção relevante consiste na substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares, o que reduz o conteúdo de carbono no produto final. Esta abordagem permite reduções imediatas, dado que se baseia em tecnologias já disponíveis. Contudo, a sua eficácia está condicionada pela disponibilidade local dos materiais substitutos e pela flexibilidade das normas técnicas que regem a formulação dos cimentos (Hasanbeigi et al., 2012).

Entre as tecnologias emergentes com maior potencial de descarbonização, destaca-se a CCUS. A aplicação destas tecnologias no setor cimenteiro pode permitir reduções significativas, sendo particularmente eficazes na mitigação das emissões de processo — aquelas decorrentes da decomposição térmica do calcário — que não podem ser eliminadas apenas com a substituição de combustíveis (Pisciotta et al., 2023). Todavia, os elevados custos de investimento, a necessidade de infraestruturas de transporte e armazenamento de CO₂ e a ausência de modelos de negócio viáveis a longo prazo continuam a representar entraves à sua implementação em larga escala (IEA, 2023).

Nos últimos anos, as emissões de Âmbito 3 têm vindo a ganhar maior destaque na análise do setor cimenteiro (Jain, 2023). Estas emissões, frequentemente superiores em magnitude às

emissões diretas, constituem um desafio particularmente complexo, pois situam-se fora do controlo direto das empresas e exigem uma articulação multissetorial entre os diversos agentes da cadeia de valor.

Os estudos mais recentes têm procurado mapear essas fontes indiretas de emissão ao longo de todo o ciclo de vida do cimento — desde a extração das matérias-primas até à demolição e deposição final — com o objetivo de identificar pontos críticos de intervenção (Jain, 2023). Entre as principais medidas de mitigação identificadas destacam-se: o aumento da eficiência logística, a reciclagem de RC&D e a adoção de tecnologias de reutilização de materiais (Pamenter & Myers, 2021).

Apesar do progresso já alcançado na redução das emissões do setor, subsistem lacunas significativas de conhecimento, especialmente no que diz respeito ao Âmbito 3, ainda pouco compreendido e insuficientemente integrado nas práticas de medição e reporte corporativo, conforme evidenciado na Tabela 2 (Pamenter & Myers, 2021). Torna-se, por isso, essencial o desenvolvimento de mecanismos de integração entre os agentes da cadeia de valor, que permitam compreender as interdependências entre as diferentes etapas do processo produtivo e fundamentem o desenho de políticas públicas mais eficazes.

Neste contexto, é imprescindível considerar o conceito de ESG (*Environmental, Social and Governance*, traduzido como Meio Ambiente, Social e Governança), que ganhou especial relevância na última década como pilar fundamental na transformação das práticas empresariais rumo à sustentabilidade. O ESG tem-se consolidado como uma abordagem que ultrapassa a mera análise financeira, promovendo o compromisso empresarial com as dimensões ambiental, social e de governança (Cruz, 2022, p.150).

A evolução do ESG está intimamente ligada a iniciativas e compromissos globais, com o objetivo de mitigar os impactos das alterações climáticas, combater desigualdades estruturais e promover uma economia mais justa, inclusiva e resiliente. A sua incorporação efetiva permite não só uma melhor performance ambiental e social, mas também uma estratégia empresarial racional e financeiramente vantajosa, pois contribui para reduzir riscos reputacionais, aumentar a eficiência operacional e atrair investimentos sustentáveis (Martini & Schreiber, 2025).

Importa sublinhar que estes critérios industriais sustentáveis não se limitam à promoção da neutralidade carbónica, estando igualmente alinhados com os ODS (Oyewo et al., 2024).

Os ODS foram estabelecidos em 2015 pela Assembleia Geral das Nações Unidas e definem um conjunto de 17 metas globais destinadas a enfrentar os principais desafios ao desenvolvimento sustentável. Estes objetivos abrangem questões como a erradicação da pobreza, igualdade de género, acesso à saúde e educação, crescimento económico e combate às alterações climáticas (Ravalison et al., 2023). A sua premissa central é a promoção de um desenvolvimento equilibrado que integre as dimensões social, económica e ambiental (Medeiros, 2020). Os 17 ODS são: ODS 1 (Erradicar a Pobreza); ODS 2 (Erradicar a Fome); ODS 3 (Saúde de Qualidade); ODS 4 (Educação de Qualidade); ODS 5 (Igualdade de Género); ODS 6 (Água Potável e Saneamento); ODS 7 (Energia Acessível e Limpa); ODS 8 (Trabalho Digno e Crescimento Económico); ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestruturas); ODS 10 (Redução das Desigualdades); ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis); ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis); ODS 13 (Ação Climática); ODS 14 (Proteger a Vida Marinha); ODS 15 (Proteger a Vida Terrestre); ODS 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes); e ODS 17 (Parcerias para a Implementação dos Objetivos) (UNRIC, 2024).

Estes objetivos servem como referência estratégica para a ação empresarial, promovendo a integração de critérios ambientais, sociais e económicos nas decisões operacionais e de investimento. A sua implementação pode catalisar a inovação tecnológica, a eficiência energética e a diversificação de matérias-primas, contribuindo de forma direta para a redução da intensidade carbónica da produção (Saravanakumar et al., 2024).

Os ODS incentivam, ainda, uma abordagem integrada e sistémica, assente na evolução para cadeias de abastecimento mais sustentáveis e na adoção de princípios de circularidade (Guimarães et al., 2023). Paralelamente, as iniciativas que decorrem da sua aplicação impulsionam o desenvolvimento de ambientes regulatórios mais exigentes, mas também mais favoráveis à investigação e inovação em tecnologias de baixo carbono (Sundaramoorthy et al., 2023).

4.1. Economia Circular

O Parlamento Europeu (2023) define a economia circular como “(...) um modelo de produção e de consumo que envolve a partilha, o aluguer, a reutilização, a reparação, a renovação e a reciclagem de materiais e produtos existentes, enquanto possível. Desta forma, o ciclo de vida dos produtos é alargado. Na prática, a economia circular implica a redução do desperdício ou dos resíduos ao mínimo. Quando um produto chega ao fim do seu ciclo de vida, os seus materiais são

mantidos dentro da economia sempre que possível graças à reciclagem. E podem, deste modo, ser utilizados uma e outra vez, o que permite criar mais valor.”

A transição para uma economia circular na indústria do cimento é considerada essencial para o cumprimento dos ODS, com especial destaque para o ODS 12, que promove padrões de produção e consumo sustentáveis. No entanto, esta transição contribui igualmente para outros ODS relevantes, como o ODS 9, relativo à inovação e infraestruturas, e o ODS 13, que visa a ação climática.

Segundo Meddah et al. (2022), uma das práticas centrais da economia circular é a reciclagem. No setor cimenteiro, esta prática procura reduzir a dependência de matérias-primas virgens, diminuir o consumo energético e, conseqüentemente, contribuir para a redução das emissões de CO₂. Assim, alinha-se diretamente com os princípios do ODS 12, ao incentivar a reutilização de materiais e a minimização de resíduos, e com o ODS 13, ao combater os efeitos das alterações climáticas. A incorporação de resíduos industriais, como as cinzas volantes, na formulação de ligantes ecológicos, constitui um exemplo concreto desta abordagem, permitindo o desenvolvimento de betões mais duráveis e com menor pegada carbónica. Esta prática reforça igualmente o ODS 9, ao fomentar a inovação industrial, e o ODS 11, ao promover a criação de infraestruturas mais resilientes e sustentáveis (Costa & Marques, 2018).

A valorização de resíduos representa outra dimensão fundamental da economia circular. Este processo permite reduzir o volume de resíduos enviados para aterro, ao mesmo tempo que minimiza a necessidade de extração de novos recursos, contribuindo para os ODS 11 e 12. Além disso, promove uma abordagem local e eficiente de reaproveitamento de materiais, com impactos positivos na sustentabilidade urbana e na preservação dos ecossistemas terrestres (Frias et al., 2023).

Para além dos benefícios ambientais, a economia circular no setor cimenteiro pode também gerar impactos económicos e sociais relevantes. A promoção do reaproveitamento de resíduos locais e o incentivo à inovação na produção de materiais sustentáveis criam novas oportunidades de negócio e emprego, particularmente em regiões com menor desenvolvimento económico. Estas iniciativas favorecem o ODS 8, ao impulsionar um crescimento económico inclusivo e sustentável, e o ODS 10, ao contribuir para a redução das desigualdades através da criação de valor económico a nível local (Ibáñez-Gosálvez et al., 2021).

A integração de práticas circulares na indústria do cimento está, assim, profundamente alinhada com os objetivos da Agenda 2030 da UE. Ao conjugar a reutilização de materiais, a redução de emissões, o uso de energia renovável e a inovação tecnológica, a economia circular constitui um pilar estratégico para mitigar os impactos ambientais das atividades industriais, enquanto promove o desenvolvimento económico sustentável.

4.2. Sensibilização dos Fornecedores

A sensibilização dos fornecedores constitui um passo essencial para garantir a eficácia das práticas de compras sustentáveis. Ao promover formação especializada junto destes parceiros, é possível colmatar lacunas de conhecimento, fomentar a compreensão dos princípios da sustentabilidade e incentivar a adoção de comportamentos ambiental e socialmente responsáveis nas suas operações. Estas ações facilitam o alinhamento estratégico entre fornecedores e compradores, contribuindo diretamente para o cumprimento de diversos ODS, com destaque para o ODS 12 e o ODS 13 (Demarchi et al., 2023).

Koch et al. (2022) sublinham que a avaliação socioambiental dos fornecedores, baseada na análise de dados provenientes de relatórios de sustentabilidade, constitui uma ferramenta crucial para identificar riscos e oportunidades ao longo da cadeia de valor. No setor cimenteiro, esta prática pode traduzir-se na exigência de aquisição de matérias-primas provenientes de fornecedores certificados, na promoção de práticas de economia circular e na adoção de medidas específicas para a redução de emissões de GEE.

A seleção criteriosa de fornecedores é outro fator transformador. A adoção de métodos de decisão multicritério, que integrem, para além do desempenho económico, aspetos ambientais e sociais, permite optar por fornecedores com melhores práticas sustentáveis. Este processo reforça a coerência estratégica entre as políticas de compras e os compromissos ambientais das empresas, especialmente com os ODS 12, 13 e 17 (Zaman & Mishra, 2023).

No entanto, a implementação de práticas sustentáveis ainda enfrenta vários obstáculos, nomeadamente a falta de formação técnica, a resistência à mudança, os custos associados à adoção de tecnologias mais limpas e a escassa colaboração entre os parceiros da cadeia de abastecimento (Demarchi et al., 2023). Neste contexto, torna-se fundamental investir em programas contínuos de capacitação técnica, proporcionar acompanhamento especializado e incentivar a partilha de boas práticas entre os intervenientes da cadeia de valor (Nteta & Mushonga, 2021).

A construção de relações de confiança e de colaboração com os fornecedores revela-se igualmente determinante. Parcerias sustentadas ao longo da cadeia de valor facilitam a implementação de soluções conjuntas e sistemas de melhoria contínua. No setor cimenteiro, estas relações reforçam o compromisso coletivo com os princípios da sustentabilidade e alinham-se diretamente com o ODS 17 (Krainer et al., 2022).

Importa ainda destacar o papel das micro e pequenas empresas, frequentemente presentes na cadeia de fornecimento do setor cimenteiro. Estas entidades, que geralmente dispõem de recursos técnicos e financeiros limitados, carecem de apoio específico para desenvolver competências de responsabilidade social e ambiental. Segundo Oliveira et al. (2019), é crucial que as grandes empresas assumam um papel ativo no apoio técnico, na formação e na disponibilização de incentivos adequados a estas empresas de menor dimensão. Esta abordagem promove um crescimento económico mais inclusivo e sustentável, em consonância com o ODS 8 (trabalho digno e crescimento económico).

Em suma, a sensibilização dos fornecedores pode desempenhar um papel estruturante na transição da indústria cimenteira para a neutralidade carbónica. Através da formação técnica, da integração de critérios ambientais, do apoio a pequenas empresas, da seleção responsável e do fomento de parcerias, é possível construir uma cadeia de abastecimento mais resiliente, ética e alinhada com os ODS.

4.3. O Papel da Inteligência Artificial na Indústria Cimenteira

A IA desempenha um papel cada vez mais relevante na transformação digital da indústria cimenteira, configurando-se como uma ferramenta estratégica para a descarbonização e para o cumprimento dos ODS. Neste setor, caracterizado por processos intensivos em energia e emissões, a IA emerge como um aliado essencial ao permitir a otimização de operações, a redução de desperdícios e a minimização da pegada de carbono (Silva et al., 2022).

Um dos contributos mais significativos da IA para a indústria do cimento é a melhoria da eficiência energética e da gestão de recursos, impactando diretamente o ODS 12, referente ao consumo e produção sustentável. Através da aplicação de algoritmos de aprendizagem automática e de sistemas de análise preditiva, é possível realizar uma monitorização em tempo real do consumo energético, identificando de forma imediata ineficiências e permitindo ajustes

automatizados no processo produtivo. Esta capacidade de antecipação contribui para a redução do uso de matérias-primas e das emissões de CO₂, sem comprometer a produtividade (Piazza, 2023).

A IA pode também atuar como facilitador da economia circular no setor cimenteiro, através da modelação preditiva e da análise de grandes volumes de dados, otimizando cadeias de abastecimento, logística de resíduos e valorização de subprodutos industriais. Estas funcionalidades promovem a reutilização eficiente de recursos, em consonância com o ODS 12, e potenciam ganhos simultâneos em eficiência económica e desempenho ambiental (Carvalho et al., 2022).

Outro eixo de aplicação da IA reside na integração com sensores e sistemas de controlo inteligente. Estes permitem o acompanhamento contínuo das emissões em várias fases do processo de fabrico, desde a clínquerização até à moagem, facilitando a identificação de pontos críticos e possibilitando intervenções preventivas ou corretivas automatizadas. Este nível de automação reforça a modernização industrial, alinhada com o ODS 9, ao mesmo tempo que contribui diretamente para o ODS 13 (Oliveira et al., 2023).

A aplicação da IA no desenvolvimento e otimização de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono representa outro contributo relevante para a descarbonização da produção de cimento. Através de modelos avançados de simulação, a IA permite prever o comportamento de materiais, condições operacionais e reações químicas envolvidas na captura de CO₂, viabilizando processos mais eficientes e economicamente sustentáveis. Esta aplicação é central para mitigar as emissões de processo que ocorrem na decomposição térmica do calcário — um dos maiores desafios ambientais do setor (Neves et al., 2023).

Em síntese, a IA apresenta-se como uma solução multifacetada, com impacto transversal na eficiência energética, inovação tecnológica e adoção de práticas sustentáveis no setor cimenteiro. A sua implementação representa não só uma resposta eficaz aos desafios ambientais, mas também uma oportunidade estratégica para modernizar o setor, aumentar a sua competitividade e posicioná-lo como protagonista na transição para uma economia de baixo carbono, em alinhamento com as metas globais de sustentabilidade.

5. Hipóteses de Investigação

Com base nas principais alavancas de descarbonização identificadas para o setor cimenteiro e nas questões de investigação anteriormente definidas, foram formuladas três hipóteses que orientam este estudo:

Hipótese 1 (H1): A indústria cimenteira pode alavancar a redução das emissões de Âmbito 3 através da adoção de práticas de economia circular.

Relação com a Questão de Investigação 1 (Q1): A validação desta hipótese permitirá analisar de que forma a aplicação de princípios de economia circular — como a utilização de matérias-primas recicladas, a valorização de resíduos e a redução da dependência de recursos virgens — pode contribuir para a mitigação das emissões de Âmbito 3 na indústria cimenteira. Ao contextualizar estas práticas no setor cimenteiro, esta hipótese possibilita identificar barreiras e oportunidades concretas, bem como avaliar o seu impacto real na pegada de carbono ao longo da cadeia de valor. A confirmação da H1 poderá fornecer evidência empírica sobre a capacidade transformadora da economia circular como instrumento de sustentabilidade e resiliência no setor.

Hipótese 2 (H2): A seleção e sensibilização de fornecedores contribui para a redução das emissões de Âmbito 3 na indústria cimenteira.

Relação com a Questão de Investigação 2 (Q2): Esta hipótese visa compreender como a integração de critérios ambientais nos processos de seleção e capacitação dos fornecedores pode reduzir as emissões associadas às fases indiretas da produção de cimento. Ao estudar as práticas de avaliação socioambiental, formação técnica e colaboração estratégica com os parceiros da cadeia de abastecimento, pretende-se avaliar o impacto destas ações na pegada de carbono do setor. A validação da H2 poderá demonstrar a eficácia de uma gestão colaborativa da cadeia de valor, promovendo uma abordagem mais integrada, sustentável e alinhada com as metas climáticas e regulatórias.

Hipótese 3 (H3): A aplicação de inteligência artificial na indústria cimenteira favorece a redução das emissões de CO₂ de Âmbito 3.

Relação com a Questão de Investigação 3 (Q3): Testar esta hipótese permitirá explorar o potencial da IA enquanto ferramenta tecnológica para a monitorização, análise e otimização de processos indiretos, com impacto direto nas emissões de Âmbito 3. Através da análise de soluções baseadas em IA — como sistemas de previsão, gestão de dados logísticos e controlo em tempo real — esta hipótese propõe avaliar de que forma a digitalização pode representar uma vantagem

operacional e ambiental para o setor cimenteiro. A sua validação poderá demonstrar o contributo da inovação tecnológica na transição para uma indústria mais sustentável, eficiente e competitiva.

A descarbonização da indústria cimenteira representa, simultaneamente, um dos maiores desafios e uma das principais oportunidades para a transição climática a nível global. O setor tem evidenciado um compromisso crescente com a neutralidade carbónica, apoiado por estratégias e roteiros nacionais e europeus que enquadram os esforços de inovação, cooperação e investimento. As três hipóteses agora definidas permitem, assim, explorar soluções integradas e orientadas para a ação, com potencial para gerar impactos reais e mensuráveis na redução das emissões indiretas, contribuindo de forma significativa para os objetivos globais de sustentabilidade.

6. Metodologia

O presente estudo adota uma abordagem metodológica assente no método hipotético-dedutivo, desenvolvido por Karl Popper, o qual se revela particularmente adequado quando se procura investigar fenómenos complexos e ainda insuficientemente explicados pela literatura existente. Segundo Prodanov & Freitas (2013, p. 32), este modelo parte do pressuposto de que “quando os conhecimentos disponíveis sobre determinado assunto são insuficientes para a explicação de um fenómeno, surge o problema. Para tentar explicar as dificuldades expressas no problema, são formuladas conjeturas ou hipóteses. Das hipóteses formuladas, deduzem-se consequências que deverão ser testadas ou falseadas”.

Neste contexto, o método hipotético-dedutivo estrutura-se a partir da identificação de um problema de investigação concreto, neste caso, as dificuldades associadas à mitigação das emissões de Âmbito 3 no setor cimenteiro. A partir desta problemática, foram formuladas três hipóteses de investigação, sustentadas por conhecimento teórico e por evidência empírica preliminar. Estas hipóteses representam propostas explicativas que procuram responder às questões de investigação previamente definidas. Através de um processo sistemático de análise e inferência, estas hipóteses serão testadas, podendo ser validadas — caso revelem capacidade explicativa e resolutive — ou refutadas, caso se verifique que não oferecem soluções eficazes para o problema estudado.

A opção por este modelo metodológico justifica-se, em primeiro lugar, pela sua robustez lógica, permitindo estabelecer relações causais entre variáveis relevantes. Em segundo lugar, trata-se de uma abordagem particularmente eficaz em contextos complexos, como o da indústria cimenteira, que envolve múltiplos atores, processos produtivos altamente intensivos em carbono, e exigências regulatórias crescentes. Por fim, o método hipotético-dedutivo proporciona um quadro analítico coerente, capaz de integrar conhecimento técnico, ambiental e estratégico, com vista à formulação de recomendações sustentadas para a descarbonização do setor.

A operacionalização da investigação foi conduzida segundo uma abordagem qualitativa, sustentada na análise documental de dados secundários, nomeadamente relatórios de sustentabilidade, publicações académicas, estudos de caso setoriais e documentos estratégicos de empresas nacionais e internacionais, tanto do setor cimenteiro como de outros setores industriais com desafios semelhantes.

A investigação decorreu segundo um fluxo metodológico estruturado em quatro principais etapas sequenciais, conforme ilustrado na Figura 3:

1. Identificação das alavancas de descarbonização com potencial para reduzir as emissões de Âmbito 3, com base na literatura científica, em documentos estratégicos europeus e nacionais (como os roteiros da Cembureau e da ATIC), e na análise de práticas setoriais já implementadas;
2. Análise de exemplos de empresas de referência em outros setores de atividade, como o setor da energia, metalúrgico ou agroalimentar, que adotaram práticas associadas às alavancas estudadas (economia circular, seleção de fornecedores e IA) e que reportaram reduções relevantes nas suas emissões indiretas;
3. Adaptação e transposição dessas práticas para o contexto específico da indústria do cimento, tendo em consideração as suas características técnicas, operacionais, estruturais e regulamentares, com o objetivo de avaliar a sua viabilidade e aplicabilidade prática;
4. Avaliação do impacto esperado da adoção dessas práticas nas principais categorias de emissões do Âmbito 3, de acordo com a metodologia do *GHG Protocol*, procurando estimar os benefícios potenciais e as condições necessárias à sua implementação no setor cimenteiro.

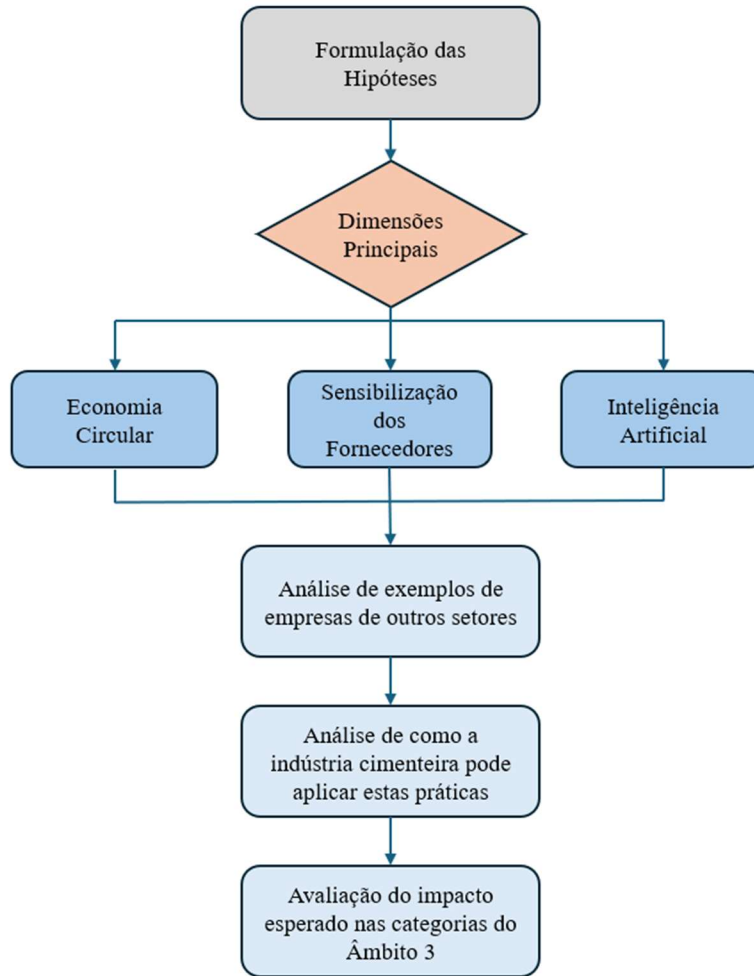


Figura 3- Fluxo Metodológico da Investigação

A escolha por uma metodologia qualitativa fundamenta-se na necessidade de compreender em profundidade as dinâmicas organizacionais, tecnológicas e colaborativas associadas à redução das emissões de Âmbito 3, o que não seria possível captar adequadamente através de metodologias quantitativas. Esta abordagem permite explorar significados, estratégias, perceções e condicionantes contextuais das práticas de sustentabilidade na cadeia de valor da indústria do cimento.

A recolha de dados foi realizada através de fontes secundárias fiáveis, incluindo:

- Relatórios de sustentabilidade e ESG de empresas cimenteiras (como Cimpor e Secil);
- Casos práticos documentados em empresas de outros setores com boas práticas reconhecidas;
- Publicações científicas recentes sobre descarbonização, economia circular, gestão da cadeia de valor e IA;

- Documentos institucionais de entidades como a Agência Internacional de Energia (IEA), *World Cement Association*, ATIC e Cembureau.

A análise dos dados recolhidos permitiu testar empiricamente as hipóteses formuladas, através da comparação entre as práticas observadas e os objetivos definidos para a redução das emissões de Âmbito 3 no setor cimenteiro. Este processo visou aferir a aplicabilidade, viabilidade e impacto potencial das medidas analisadas, bem como as condições críticas de sucesso para a sua implementação eficaz.

Por fim, esta metodologia visa contribuir não apenas para o avanço do conhecimento científico sobre as emissões indiretas na indústria cimenteira, mas também para a formulação de recomendações práticas que possam ser consideradas por gestores industriais, legisladores e outras partes interessadas envolvidas na transição para uma economia de baixo carbono.

7. Teste de Hipóteses

Com base nos fundamentos teóricos apresentados na revisão de literatura, foram formuladas hipóteses que procuram dar resposta às questões de investigação definidas neste estudo. A investigação incide sobre três dimensões fundamentais: a adoção de práticas de economia circular, a sensibilização e seleção estratégica de fornecedores e a aplicação da IA como vetor de transformação no setor cimenteiro. Estas dimensões foram identificadas como alavancas críticas no processo de descarbonização, particularmente no que se refere à mitigação das emissões de Âmbito 3.

As hipóteses formuladas visam, assim, aprofundar a compreensão sobre o potencial destas estratégias na redução das emissões indiretas associadas à cadeia de valor da produção de cimento. Cada hipótese será analisada com base em evidência empírica recolhida de casos práticos, de setores distintos ou da própria indústria cimenteira, de modo a aferir a sua viabilidade, aplicabilidade e impacto real.

Deste modo, esta secção estrutura-se em torno da apresentação e análise crítica de cada hipótese de investigação, constituindo uma etapa central para o desenvolvimento do modelo proposto e para a obtenção de conclusões relevantes no âmbito da transição sustentável da indústria do cimento.

7.1. Hipótese 1- Economia Circular

A primeira questão de investigação (RQ1) prende-se com a necessidade de o setor cimenteiro reduzir a sua dependência de recursos e matérias-primas no seu processo de produção, de forma a diminuir as emissões ao longo da sua cadeia de valor. Colocamos como hipótese a economia circular como uma possível abordagem, explorando o seu potencial para otimizar a utilização dos materiais e minimizar os desperdícios.

Uma das principais práticas de economia circular é a incorporação de resíduos e materiais reciclados do próprio setor, ou de outros, no processo produtivo.

Diversas empresas de outros setores já adotaram práticas de economia circular. A BMW, por exemplo, tem vindo a integrar progressivamente materiais reciclados no fabrico dos seus veículos, substituindo componentes de origem fóssil por alternativas mais sustentáveis. Uma das iniciativas envolve a utilização de redes de pesca descartadas e outros resíduos plásticos marítimos na produção de peças interiores, como tapetes e revestimentos do teto (BMW Group, s.d.).

Atualmente, cerca de 30% dos materiais usados nos veículos da BMW são reciclados ou reutilizados, incluindo aço, cobre e alumínio. Estas práticas permitem diminuir as emissões associadas à extração, transformação e transporte de matérias-primas virgens, contribuindo significativamente para a redução das emissões de Âmbito 3 da empresa, com foco na categoria 1. A BMW estima que os plásticos reciclados provenientes da indústria marítima apresentam uma pegada de carbono aproximadamente 25% inferior à fabricação dos plásticos convencionais (BMW Group, 2022).

A BMW, ao apostar em materiais recicláveis e reutilizáveis também tem um impacto direto sobre a categoria 12, pois promove a reciclagem e o reaproveitamento dos componentes dos veículos. Ao projetar veículos com uma maior capacidade de reutilização dos materiais, a BMW não só minimiza a quantidade de resíduos que vai para os aterros, mas também reduz as emissões associadas ao processo de desmontagem, tratamento e disposição dos produtos no fim da sua vida útil. A promoção de práticas que favoreçam a reciclabilidade dos veículos contribui para uma redução significativa das emissões de carbono durante esta fase do ciclo de vida do produto, um passo crucial para a empresa no caminho para a neutralidade carbónica. Assim, ao alinhar-se com as práticas de economia circular, a BMW não só reduz a necessidade de novos materiais, como também mitiga os impactos ambientais do fim da vida dos seus veículos.

A Nestlé é outra empresa que tem demonstrado um compromisso crescente com práticas de economia circular, adotando várias iniciativas para reduzir o impacto ambiental de suas operações. Um exemplo é a utilização de plástico reciclado no mobiliário de esplanada, que faz parte da sua estratégia para diminuir a dependência de plásticos virgens e reduzir os desperdícios gerados. A empresa tem como objetivo assegurar que 100% dos materiais utilizados na decoração e mobiliário de suas esplanadas sejam produzidos com materiais recicláveis, contribuindo para a redução do uso de plásticos não recicláveis e favorecendo o reaproveitamento de resíduos plásticos (Amado, 2021).

Para além disso, desde 2018, a Nestlé reduziu em 10,5% a utilização de plásticos virgens na produção das suas embalagens, com o objetivo de alcançar uma redução total de cerca de 30% até 2025. Além disso, a empresa comprometeu-se a tornar 100% das suas embalagens recicláveis ou reutilizáveis até 2025, tendo já atingido 81.9% de embalagens recicláveis no seu portefólio global (Nestlé Portugal, s.d.).

Esta abordagem reflete diretamente na redução das emissões de Âmbito 3 da empresa, especialmente na categoria 1. Ao utilizar materiais reciclados, a empresa reduz a procura por matérias-primas virgens, o que por sua vez reduz as emissões de CO₂ associadas à extração, transformação e transporte desses materiais. Além disso, ao reduzir a quantidade de plástico virgem necessário para a produção de seus produtos, a Nestlé também diminui as emissões associadas ao transporte desses materiais para os locais de produção.

Outro benefício dessa estratégia é a contribuição para a redução das emissões associadas à categoria 11. Como a Nestlé está comprometida com o uso de materiais recicláveis, os produtos ao final da sua vida útil podem ser reciclados mais facilmente, diminuindo assim o impacto ambiental e contribuindo para a promoção da economia circular. Isso se traduz em uma redução das emissões associadas à gestão de resíduos, uma vez que menos plásticos acabam em aterros ou sendo incinerados.

Na indústria cimenteira, a incorporação de resíduos e materiais constitui uma alavanca fundamental para a redução das GEE de Âmbito 1, podendo também ter impacto no Âmbito 3. No processo de produção de cimento, é feita a incorporação de matérias-primas alternativas em duas fases: na produção de clínquer, onde existe substituição de matérias-primas virgens pelas alternativas, como RC&D, escórias ou cinzas, e na produção de cimento, onde existe substituição de clínquer por adições alternativas.

Contudo esta substituição apresenta limitações, principalmente devido à necessidade de garantir a qualidade, a performance e a durabilidade do produto final. No caso da produção de clínquer, as matérias-primas alternativas só podem substituir entre 5% a 10%, do total de matérias-primas. Este limite deve-se ao facto de o clínquer exigir uma composição química e mineralógica muito precisa para assegurar a formação adequada das fases hidráulicas que conferem ao cimento as suas propriedades de resistência mecânica e durabilidade. Substituições acima desse intervalo podem comprometer a reatividade, a resistência e o desempenho do cimento, tornando-o inadequado para aplicações estruturais ou exigentes. Por outro lado, na produção do cimento existe uma maior flexibilidade para a incorporação de adições minerais (Martins, 2022). Por exemplo, os cimentos compostos (CEM II) podem conter entre 65% e 94% de clínquer, enquanto os cimentos com escória (CEM III) podem reduzir o clínquer para 35%, dependendo da formulação. Em casos específicos, é possível atingir composições com apenas 30% a 40% de clínquer, sem comprometer

a performance, desde que sejam utilizadas adições com boas propriedades hidráulicas ou pozolânicas.

Ao reduzir a necessidade de extração e processamento de matérias-primas naturais, esta estratégia tem impacto direto em várias categorias das emissões de Âmbito 3. Em particular, contribui para a diminuição das emissões na categoria 1, uma vez que os resíduos utilizados como substitutos têm, em regra, uma pegada de carbono inferior à das matérias-primas extraídas. Reduzem-se também as emissões da categoria 3, devido à substituição parcial de combustíveis fósseis por resíduos com potencial energético, como os CDRs e a biomassa. Também pode ter efeitos positivos na categoria 5, pois a valorização de resíduos internos diminui o volume de resíduos enviados para aterro ou incineração.

Contudo é importante também referir que a utilização de matérias-primas alternativas, em determinadas circunstâncias, podem ter um efeito menos positivo na categoria 4. Tal deve-se ao facto de algumas matérias-primas alternativas não estarem localizadas no mesmo local que o calcário, implicando transporte adicional ou outros impactos ambientais associados, isto é, geralmente as pedreiras das matérias-primas virgens estão localizadas mesmo ao lado das fábricas de cimento, enquanto a compra de matérias-primas alternativas poderá ser necessário realizar o transporte de um local mais distante, como a fábrica de onde são produzidos. Pode ter um efeito positivo na categoria 4 se os materiais alternativos forem produzidos dentro da própria fábrica.

As sinergias industriais, permitem que os resíduos, subprodutos ou excedentes energéticos de uma empresa sejam utilizados como recursos produtivos por outra, promovendo a cooperação entre as indústrias e setores. Essa abordagem não apenas reduz significativamente a geração de resíduos, mas também diminui a extração de matérias-primas virgens, o consumo energético e as emissões de GEE associadas a essas atividades (Damineli & John, 2012).

A AVE (Gestão Ambiental e Valorização Energética), em parceria com a indústria cimenteira, tem desempenhado um papel relevante na descarbonização do setor através da valorização energética de resíduos. Esta colaboração foca-se na transformação de resíduos como plásticos mistos, têxteis e madeiras em CDRs e matérias-primas secundárias para a produção de clínquer. Esta abordagem inovadora não só permitiu a substituição de combustíveis fósseis, como o *petcoke*, por fontes alternativas mais sustentáveis, mas também gerou benefícios económicos e ambientais significativos (INEGI, 2024).

Entre 2005 e 2013, a substituição de cerca de 520 mil toneladas de *petcoke* por CDR resultou numa redução estimada de 1,5 milhões de toneladas de emissões de CO₂. Esta transição traduz-se numa melhoria concreta das emissões de Âmbito 3, em particular em várias das suas categorias mais relevantes (INEGI, 2024).

Uma das formas de reduzir as emissões de Âmbito 3 na indústria cimenteira é através da colaboração com o setor da construção e demolição. Os RC&D, como betão ou cerâmica, podem ser utilizados como agregados reciclados ou matérias-primas alternativas na produção de clínquer e cimento. Esta prática reduz significativamente as emissões associadas à categoria 1, ao evitar a extração e o processamento de materiais virgens com elevada intensidade carbónica. Além disso, ao incorporar estes resíduos no processo produtivo, diminui-se a quantidade de resíduos enviados para aterro, o que contribui para mitigar as emissões da categoria 5.

Para além disso, também terá um impacto na categoria 12, dado que, quando o cimento chega ao seu fim de vida, a incorporação de RC&D são incorporados no processo de produção, em vez de serem enviados para aterro.

A integração com a indústria siderúrgica e energética também contribui para a descarbonização do Âmbito 3, nomeadamente através da incorporação de subprodutos como escórias de alto-forno e cinzas volantes na fase de moagem do cimento. Estas adições minerais permitem reduzir o teor de clínquer nos cimentos finais. Esta estratégia atua sobre a categoria 1, pois os subprodutos de outros processos industriais, como as escórias e cinzas têm, em regra, uma pegada carbónica muito inferior à do clínquer.

Outra medida de economia circular é a valorização energética de resíduos para substituir combustíveis fósseis. Esta prática para além de reduzir as emissões de CO₂ de Âmbito 1, visto que não estão a ser usados combustíveis fósseis, dá também um destino sustentável a materiais que, de outra forma, seriam descartados em aterros (Aquino, 2024).

A Nestlé tem vindo a adotar medidas estratégicas de economia circular com impacto direto na redução das emissões de GEE de Âmbito 3, ao integrar soluções de valorização energética de resíduos orgânicos nas suas unidades industriais. Um exemplo desta abordagem é a fábrica de chocolates de La Penilla de Cayón, na Cantábria (Espanha), onde a empresa instalou uma caldeira de biomassa que utiliza as cascas de cacau, subproduto do processo de torrefação, como biocombustível renovável. Este sistema permite gerar cerca de 12500 toneladas de vapor por ano, o equivalente a 10% da energia térmica utilizada na unidade, com uma redução anual de cerca de

2500 toneladas de CO₂. Com o aumento da capacidade da caldeira em 2024 em 40%, esta redução passou a ser de até 5350 toneladas de CO₂ por ano (Electrocholo, 2024).

Estas práticas têm impacto na categoria 3, dado que ao utilizar os seus próprios resíduos como combustível, a Nestlé reduz a dependência da aquisição de materiais energéticos externos, o que se traduz numa menor pegada carbónica associada à aquisição de recursos energéticos. O mesmo acontece ao substituir combustíveis fósseis como gás natural por biomassa residual produzida internamente, a Nestlé reduz as emissões associadas à extração, refinação, transporte e distribuição de combustíveis fósseis.

Adicionalmente, evita-se a emissão de gases resultantes do transporte de energia convencional. Na categoria 4, a produção local de energia com biomassa residual também permite reduzir as emissões associadas ao transporte de combustíveis, já que elimina a necessidade de abastecimento regular de gás natural ou outros combustíveis fósseis, muitas vezes transportados por camião ou por pipeline, dado que o resíduo tem origem dentro da fábrica.

Por fim, o impacto na categoria 5, prende-se com a valorização energética das cascas de cacau, e noutras fábricas, de resíduos de café, evita o envio de resíduos orgânicos para aterro ou incineração sem aproveitamento energético, destinos que contribuem significativamente para as emissões de metano e CO₂. Ao fechar o ciclo dos resíduos dentro da própria operação, a Nestlé aplica de forma exemplar os princípios da economia circular, ao transformar subprodutos em recursos energéticos.

Ao integrar estas soluções nas suas fábricas, a Nestlé não só reduz as emissões diretas (Âmbito 1), como também mitiga significativamente as emissões indiretas (Âmbito 3). Esta abordagem permite à empresa diminuir a sua dependência de combustíveis fósseis, promover a autonomia energética baseada em resíduos próprios e, acima de tudo, transformar passivos ambientais em ativos sustentáveis.

A Unilever, empresa multinacional que atua no setor de bens de consumo, tem se destacado pelas suas iniciativas de sustentabilidade e práticas de economia circular. Um exemplo notável de como a empresa utiliza resíduos próprios para gerar energia renovável ocorre na fábrica da Unilever em Pouso Alegre, Brasil, onde foi implementado um biodigestor que trata de cerca de 12 toneladas de resíduos orgânicos por dia, gerando aproximadamente 1100 metros cúbicos normal (Nm³) de biogás diariamente. Esse biogás é utilizado para substituir o consumo de combustíveis fósseis na produção de alimentos (Ecogen, 2023).

Esta prática de valorização energética de resíduos tem um impacto direto nas emissões de Âmbito 3 da Unilever, especialmente na categoria 3. Ao gerar sua própria energia a partir de resíduos orgânicos, a Unilever não apenas minimiza a necessidade de adquirir energia externa, mas também contribui para a redução das emissões associadas à produção e transporte de energia convencional, que tradicionalmente emitem grandes quantidades de CO₂.

Além disso, a utilização desses resíduos orgânicos, subprodutos do processo produtivo, para gerar energia permite que a Unilever desvie uma quantidade significativa de resíduos de aterros. Ao invés de enviar esses resíduos para incineração ou de os destacar em aterros, a empresa aproveita-os como uma fonte para a produção de energia limpa, promovendo um ciclo produtivo mais sustentável, tendo um impacto positivo direto na categoria 5.

Na indústria cimenteira, a valorização energética de resíduos representa uma estratégia essencial para a redução das emissões de GEE, com especial impacto nas emissões de Âmbito 3, além de contribuir para uma gestão mais eficiente e circular dos recursos. Esta prática consiste na substituição de combustíveis fósseis convencionais, como o *petcoke*, por resíduos com potencial energético, tais como pneus em fim de vida, resíduos plásticos, biomassa residual e CDRs. Em vez de serem enviados para aterros ou incinerados sem aproveitamento energético, estes resíduos são utilizados como combustíveis alternativos nos fornos de clínquer, onde as elevadas temperaturas exigidas pelo processo de produção permitem a combustão completa e segura dos materiais, com um aproveitamento energético eficiente e praticamente sem geração de cinzas.

Várias empresas do setor cimenteiro já promovem parcerias com os setores da gestão de resíduos, energia e agroindústria para integrar resíduos locais como fonte de energia nos seus processos produtivos. Estas sinergias reduzem significativamente a dependência de combustíveis fósseis, cuja extração, refinação e transporte têm um impacto significativo na pegada de carbono de Âmbito 3, enquanto promovem a valorização de resíduos industriais e urbanos num modelo de economia circular.

Do ponto de vista das emissões de Âmbito 3, esta abordagem tem um impacto direto em várias categorias. Na categoria 3, a substituição de combustíveis fósseis por resíduos com menor impacto ambiental, como a biomassa residual, reduz as emissões associadas à aquisição de combustíveis convencionais. Esta substituição evita emissões relacionadas com a extração, refinação e transporte de combustíveis fósseis, já que os resíduos são muitas vezes obtidos localmente ou gerados internamente. Na categoria 5, ao utilizar resíduos próprios como fonte

energética, evita-se o seu envio para aterro ou incineração, eliminando as emissões associadas ao seu tratamento final.

Estas iniciativas estão alinhadas com os princípios da economia circular e demonstram que os resíduos não devem ser encarados como um problema, mas sim como um recurso valioso. Para além de reduzir as emissões diretas (Âmbito 1 e 2), esta abordagem contribui para a descarbonização das cadeias de valor (Âmbito 3), ao diminuir a dependência de recursos fósseis e otimizar a utilização de materiais já existentes.

Em suma, os exemplos das empresas mencionadas mostram como a implementação de práticas de economia circular pode reduzir as emissões indiretas de CO₂ ao longo das cadeias de valor das empresas. Portanto, ao adotar modelos de economia circular, as empresas não só estão a contribuir para a redução da sua pegada de carbono, mas também a promover um futuro mais sustentável. A integração de soluções circulares nos processos de produção e consumo é uma estratégia essencial para combater as mudanças climáticas e reduzir as emissões de CO₂, especialmente aquelas que ocorrem ao longo das cadeias de valor.

Cada vez mais as empresas estão a adotar estratégias de economia circular com o objetivo de minimizar o seu impacto ambiental, nomeadamente no que diz respeito às emissões da sua cadeia de valor. Entre as medidas mais eficazes para reduzir estas emissões destaca-se a incorporação de resíduos na produção, permitindo a reutilização de materiais e a redução da extração de recursos naturais, o que reduz a dependência de novos materiais. Além disso, as sinergias industriais, através da partilha de subprodutos entre diferentes setores, fomentam um modelo produtivo mais eficiente e sustentável. A valorização energética dos resíduos, por sua vez, transforma desperdícios em fontes de energia alternativa, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e mitigando a pegada de carbono. Desta forma, ao implementarem soluções inovadoras e circulares, as empresas efetivamente diminuem as suas emissões de Âmbito 3, como também promovem um modelo económico mais sustentável, contribuindo para a transição para uma economia de baixo carbono.

A incorporação de matérias-primas alternativas recicladas, provenientes do próprio setor cimenteiro ou obtidas através de sinergias com outras indústrias, ilustra a capacidade estratégica do setor para atuar em várias categorias do Âmbito 3 das emissões. A substituição de matérias-primas virgens por recicladas contribui para a redução do impacto na categoria 1, enquanto o uso de combustíveis alternativos, tem efeitos positivos na categoria 3. A utilização de resíduos internos

e externos como insumos permite atenuar impactos na categoria 5, e a integração de subprodutos industriais, reforça a circularidade material, com reflexos positivos na categoria 12.

Referente à valorização energética dos resíduos, no setor cimenteiro o maior impacto é na categoria 3, dado que, a substituição de combustíveis fósseis por resíduos com menor impacto ambiental, reduz as emissões associadas à aquisição de combustíveis, o que diminui as emissões relacionadas com a extração, refinação e transporte de combustíveis fósseis. Também tem impacto na categoria 5, ao utilizar resíduos como fonte energética, evita-se o seu envio para aterro ou incineração, eliminando as emissões associadas ao seu tratamento final.

As medidas de economia circular analisadas têm um impacto significativo, sobretudo nas categorias 1 e 3 do Âmbito 3. Este efeito positivo resulta, em grande parte, da substituição de matérias-primas virgens por resíduos e matérias-primas alternativas, reduzindo assim as emissões associadas à extração, processamento e transporte desses recursos.

No entanto, é importante reconhecer que esta substituição não permite eliminar totalmente as emissões do Âmbito 3. A impossibilidade de substituir integralmente todas as matérias-primas utilizadas atualmente no processo produtivo limita o potencial de mitigação das medidas de economia circular por si só. Por este motivo, para alcançar reduções mais profundas e idealmente a neutralização total das emissões do Âmbito 3 será necessário complementar estas estratégias com investimentos, por exemplo, nas tecnologias CCUS.

Relativamente à categoria 4 do Âmbito 3, as medidas de economia circular podem ter um impacto positivo, desde que os resíduos ou matérias-primas alternativas sejam produzidos ou obtidos nas imediações da fábrica, ou preferencialmente no seu interior. Nesses casos, a redução nas distâncias percorridas pelos materiais traduz-se numa diminuição das emissões associadas ao transporte.

Contudo, este benefício pode ser anulado, ou mesmo invertido, se os substitutos forem provenientes de locais distantes. Nesta situação, o impacto ambiental do transporte pode ser superior ao das matérias-primas virgens tradicionais, como o calcário, que, em grande parte dos casos, é extraído em pedreiras localizadas nas proximidades das fábricas de cimento. O mesmo se aplica ao clínquer, cuja produção ocorre dentro das próprias instalações fabris. Assim, a localização e a logística associadas às matérias-primas alternativas tornam-se fatores críticos na avaliação do real benefício ambiental das estratégias de economia circular nesta categoria de emissões.

No entanto, diversos casos de sucesso demonstram que empresas que implementaram práticas de economia circular conseguiram reduzir de forma significativa as suas emissões de GEE no Âmbito 3, com especial destaque para as categorias 1, 3, 11 e 12. Conforme se observa na Tabela 2, as categorias 1 e 3 representam uma parcela substancial das emissões do Âmbito 3 nas empresas cimenteiras analisadas. Em contraste, as categorias 11 e 12 têm um peso relativo consideravelmente menor. Neste contexto, torna-se estratégico, no curto e médio prazo, priorizar a adoção de práticas circulares direcionadas às categorias 1 e 3, dado o seu impacto mais relevante nas emissões totais. Numa fase posterior, poderá então ser reforçado o foco nas categorias 11 e 12, consolidando um percurso gradual e eficiente de transição.

7.2. Hipótese 2- Sensibilização dos Fornecedores

A segunda questão de investigação (RQ2) relaciona-se com a necessidade de tornar a cadeia de valor do setor cimenteiro mais sustentável. Para dar resposta a esta questão, põem-se como hipótese a sensibilização dos fornecedores, entendida como uma estratégia com potencial para incentivar práticas mais sustentáveis nas fases iniciais do processo de produção. Esta abordagem baseia-se na ideia de que a promoção de uma maior consciencialização ambiental junto dos fornecedores, aliada a uma colaboração ativa e ao alinhamento estratégico, pode incentivar o fornecimento de materiais com menor pegada de carbono.

Uma das estratégias consideradas pelas empresas para sensibilizar os fornecedores é a promoção de formações sobre sustentabilidade e impactos ambientais. A Unilever tem vindo a assumir um papel de destaque na descarbonização da sua cadeia de valor, com um foco claro na redução das emissões de Âmbito 3. O principal foco da Unilever encontra-se nas emissões a montante, ou seja, aquelas associadas à produção e transporte de matérias-primas e embalagens, que representam mais de 60% das suas emissões da cadeia de valor. Com base no ano de referência de 2021, a empresa estabeleceu duas metas principais para 2030, validadas pela iniciativa SBTi¹ (*Science Based Targets*), uma redução de 42% nas emissões associadas ao Âmbito 3, e uma redução de 30,3% nas emissões associadas a florestas, terras e agricultura, especialmente nas matérias-primas agrícolas utilizadas nos seus produtos.

¹ SBTi é uma iniciativa internacional que certifica as metas corporativas de redução das emissões de GEE, assegurando que estão alinhadas com os objetivos climáticos e em linha com as metas do Acordo de Paris.

Para enfrentar este desafio, a empresa lançou as iniciativas colaborativas juntos com a sua cadeia de valor, como a “1.5°C Supply Chain Leaders” e a “Transform to Net Zero”, com o objetivo de trabalhar em conjunto os seus fornecedores para acelerar a ação climática e promover a partilha de boas práticas ao longo de toda a cadeia de valor (Unilever, 2025).

A iniciativa “1.5°C Supply Chain Leaders”, reúne empresas comprometidas em alinhar as suas cadeias de valor com o objetivo do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a 1,5°C. Esta plataforma visa capacitar os fornecedores a definir metas climáticas baseadas na ciência, promover a medição transparente das emissões e facilitar a partilha de boas práticas de descarbonização. Já a iniciativa “Transform to Net Zero”, lançada em 2020 por um consórcio de grandes empresas liderado pela Microsoft, do qual a Unilever é membro ativo, tem como missão acelerar a transição global para emissões líquidas nulas até 2050. Esta iniciativa aposta no desenvolvimento de ferramentas acessíveis, na disseminação de conhecimento técnico e na inclusão de toda a cadeia de valor no processo de descarbonização, promovendo também a equidade climática.

Para redução das emissões da categoria 1, a Unilever criou o “Supplier Climate Programme”, um programa de colaboração com cerca de 300 fornecedores de matérias-primas, ingredientes e embalagens, fornecendo apoio técnico e ferramentas para medir e reduzir a pegada de carbono dos produtos fornecidos (Unilever, 2025).

Na categoria 3, a Unilever tem vindo a incentivar a substituição de fontes fósseis por energia renovável na sua cadeia de abastecimento e a reduzir a utilização de matérias-primas com elevado consumo energético na produção. Esta estratégia contribui para a redução das emissões associadas à extração, transformação e transporte de combustíveis convencionais.

No que diz respeito à categoria 12, a Unilever tem promovido o uso de materiais recicláveis e embalagens reutilizáveis, aumentando a sua circularidade dos seus produtos. Esta prática evita que em fim de vida o produto acabe em aterro, reduzindo as emissões associadas a essa categoria. Por fim, a empresa tem procurado alinhar os seus investimentos, categoria 15, com os critérios ESG, incentivando projetos e fornecedores que promovam práticas sustentáveis, o que contribui para a descarbonização da cadeia de valor a jusante.

Este conjunto de ações mostra como a Unilever tem vindo a operacionalizar uma abordagem integrada à sustentabilidade, reduzindo não só as emissões diretas, mas sobretudo as

de Âmbito 3 através de inovação, colaboração com fornecedores e parceiros, e compromisso com os princípios da economia circular e da produção regenerativa.

As empresas também podem ajudar os fornecedores a reduzir as emissões de GEE, com assistência técnica e financeira. A Henkel, empresa produtora de cosméticos e produtos de limpeza, tem avançado na redução nas suas emissões de Âmbito 3, que representam mais de 90% do total da empresa. Até ao final de 2024, a empresa conseguiu reduzir as suas emissões totais de GEE em 20% em comparação com 2021 (Henkel, 2025).

Uma das principais iniciativas da Henkel para reduzir as emissões de Âmbito 3 foi o lançamento do programa “*Climate Connect*”, que tem como objetivo recolher dados das emissões dos seus fornecedores e apoiá-los na definição de medidas de descarbonização. A empresa colabora com a plataforma *Manufacture 2030* para oferecer formação e acompanhamento individualizado, com o objetivo de ajudar os fornecedores a reduzir as suas próprias emissões. Este programa está alinhado com a meta da Henkel de reduzir as emissões de Âmbito 3 em 30% até 2030, em comparação com os níveis de 2021 (Henkel, 2024).

Em termos de resultados concretos, a Henkel tem implementado várias iniciativas que contribuem para a redução das emissões de Âmbito 3. Por exemplo, a empresa substituiu matérias-primas derivados de combustíveis fósseis por matérias-primas renováveis em colaboração com fornecedores estratégicos, evitando a emissão de cerca de 200.000 toneladas de CO₂ ao longo de um projeto de quatro anos iniciado em 2022 (MIT Sloan Management Review, 2025).

Essa abordagem tem um impacto direto nas emissões de Âmbito 3 da Henkel. Na categoria 1, a colaboração com os fornecedores para medir e reduzir as suas emissões ajuda a diminuir as emissões associadas à aquisição e processamento de matérias-primas. Além disso, a categoria 4, também pode ser beneficiada, já que os fornecedores podem adotar práticas mais eficientes em termos logísticos, reduzindo as emissões associadas ao transporte de materiais.

Na indústria cimenteira a promoção de formações em sustentabilidade, com o objetivo de os capacitar para adotarem práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis, pode ser relevante para a redução das emissões associada à categoria 1. Estas formações podem ajudar os fornecedores a medir e reportar a sua pegada de carbono, a substituir fontes de energia fóssil por alternativas renováveis e a integrar resíduos como matéria-prima secundária nos seus próprios processos produtivos, permitindo reduzir as emissões indiretas associadas à extração, transformação e transporte de matérias-primas virgens. Referente ao apoio técnico e financeiro, ao

apoiar fornecedores na transição para matérias-primas com menor pegada de carbono ou na integração de resíduos valorizáveis como substitutos de recursos virgens, as cimenteiras contribuem para uma diminuição direta das emissões associadas à compra das matérias-primas. Também é possível ajudar os fornecedores a reduzir o consumo de energia de origem fóssil, substituindo-a por fontes renováveis ou otimizando os processos produtivos, o que contribui para a categoria 1 das emissões do setor cimenteiro, visto que está a ser comprado um produto mais sustentável.

Na categoria 3, as formações podem abranger temas como eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas com menor intensidade carbónica, como a biomassa residual ou os CDRs.

Adicionalmente, a capacitação e apoio técnico principalmente dos parceiros logísticos em práticas de logística sustentável pode contribuir para a otimização de rotas, a melhoria da taxa de carga dos veículos e a redução do número de viagens necessárias, poderá ter um impacto na redução das emissões associadas à categoria 4.

Tal como a Unilever demonstrou com o seu programa de capacitação para fornecedores, a formação é uma ferramenta poderosa para disseminar boas práticas, fomentar a inovação e acelerar a ação climática ao longo da cadeia de abastecimento, na indústria cimenteira, estas formações representam uma oportunidade estratégica para reforçar a colaboração com os fornecedores, reduzir emissões em várias frentes e alinhar toda a cadeia de valor com os objetivos de neutralidade carbónica.

Outra medida para sensibilizar os fornecedores para as práticas sustentáveis é o estabelecimento de metas e requisitos contratuais. A Deloitte tem vindo a integrar critérios de sustentabilidade nos seus processos de aquisição, exigindo que os fornecedores estabeleçam metas de redução de emissões baseadas na SBTi e cumpram com as normas ambientais, o que assegura que os fornecedores estejam alinhados com os objetivos climáticos da empresa (Deloitte, 2023).

Através da iniciativa *WorldClimate*, a Deloitte comprometeu-se a atingir emissões líquidas zero até 2040. Para alcançar estes objetivos, a Deloitte implementou critérios específicos nos seus processos de aquisição, incluindo questões relacionadas com a sustentabilidade nos pedidos e cláusulas contratuais que exigem dos fornecedores a definição de metas baseadas na SBTi e o cumprimento de normas ambientais (Deloitte, 2025).

Além disso, a Deloitte tem incentivado os seus fornecedores a comunicar as suas emissões e ações através da plataforma “*Carbon Disclosure Project*”, permitindo uma melhor compreensão das emissões de GEE e do percurso rumo à descarbonização (Deloitte, 2025).

A GEA, empresa internacional de engenharia e tecnologia para a indústria de processamento de alimentos, bebidas, farmacêutica e outras, também tem vindo a integrar de forma ativa critérios de sustentabilidade ambiental nos seus processos de compras, com um foco na descarbonização da cadeia de valor. A GEA passou a exigir que os seus fornecedores estabeleçam metas de redução de emissões, validadas pela SBTi, bem como a partilha de dados de emissões. Esta política é aplicada como critério de seleção e continuidade de fornecimento, sendo que os fornecedores que não cumprirem estas exigências deixam de ser considerados preferenciais (GEA, 2024).

Este modelo tem impacto direto nas emissões de Âmbito 3 da empresa, particularmente nas categorias com maior peso na sua pegada de carbono. Na categoria 1, a exigência de metas SBTi, que implica que os fornecedores tenham um plano de descarbonização bem definido com metas a médio e longo prazo, validadas pela própria SBTi, o que indica que o fornecedor estará a trabalhar para fornecer produtos com menor pegada carbónica, permite reduzir as emissões associadas à produção e fornecimento de matérias-primas, componentes e produtos semiacabados. Como os fornecedores passam a utilizar processos mais eficientes e matérias-primas com menor intensidade carbónica, os produtos entregues à GEA têm menor pegada ambiental. Na categoria 2, a mesma lógica aplica-se à aquisição de equipamentos industriais e ativos de longa duração, com fabricantes a adotar práticas mais sustentáveis e matérias recicladas, reduzindo a pegada de carbono desses bens.

Apesar de a GEA ainda não divulgar dados de redução das emissões por categoria de Âmbito 3, o seu relatório de sustentabilidade de 2023 revela que, com estas iniciativas, a empresa conseguiu reduzir globalmente as suas emissões totais de Âmbito 3 em cerca de 9% face a 2021, destacando a melhoria significativa nas emissões associadas a bens e serviços adquiridos, que representam a maior parcela da sua pegada indireta. A empresa reforça que mais de 60% dos seus principais fornecedores já estão alinhados com metas validadas pela SBTi ou em processo de adesão, o que consolida uma cadeia de abastecimento cada vez mais comprometida com os objetivos climáticos da GEA e com o Acordo de Paris (GEA, 2024).

Na indústria cimenteira, o estabelecimento de metas de sustentabilidade e a incorporação de requisitos ambientais nos contratos com fornecedores poderão representar uma alavanca poderosa para a redução das emissões de GEE, sobretudo nas categorias de Âmbito 3.

Ao exigir que os fornecedores definam e implementem metas de redução de emissões validadas pela iniciativa SBTi, as cimenteiras podem reduzir significativamente as emissões associadas à categoria 1, categoria essa particularmente relevante na indústria cimenteira, dado o peso que os materiais e serviços de apoio à operação têm na pegada de carbono. Ao trabalhar com fornecedores que utilizam matérias-primas de menor intensidade carbónica, os materiais entregues terão uma pegada ambiental substancialmente inferior.

A categoria 2 ao integrar cláusulas contratuais que incentivem, ou até mesmo obriguem, os fornecedores de bens de capital a adotar práticas sustentáveis, como o uso de materiais reciclados, o aumento da eficiência energética dos equipamentos ou a redução da intensidade carbónica dos processos de fabrico, a indústria cimenteira reduz as emissões associadas aos seus ativos fixos e contribui para o desenvolvimento de soluções industriais mais limpas. Do mesmo modo, a categoria 4 pode beneficiar da priorização de fornecedores locais ou que utilizem modos de transporte com menor intensidade carbónica. Ao encurtar as cadeias logísticas e apostar em parceiros com boas práticas de logística verde, a indústria consegue reduzir as emissões associadas ao transporte de matérias-primas e produtos intermédios.

O estabelecimento de metas ambientais nos contratos pode incluir a obrigatoriedade de reportar as emissões via plataformas como o CDP (*Carbon Disclosure Project*), tal como acontece na Deloitte. Esta prática melhora a transparência e permite que as empresas do setor cimenteiro monitorem o progresso ambiental da sua cadeia de fornecimento, identificando riscos e oportunidades de melhoria contínua. A criação de equipas dedicadas à sustentabilidade nas aquisições pode apoiar este processo, assegurando que critérios ambientais sejam integrados desde o pedido de proposta até à seleção e avaliação contínua dos fornecedores. Contudo, o estabelecimento de metas e a resposta ao CDP pode ser exigente para pequenas e médias empresas. Muitas vezes, estas empresas enfrentam limitações significativas de recursos, tanto financeiros como humanos, que dificultam a implementação de sistemas de medição e reporte de emissões. Além disso, a capacidade técnica para lidar com metodologias complexas, como preencher questionários detalhados do CDP é frequentemente reduzida. A carga administrativa adicional e a falta de equipas especializadas também representam obstáculos importantes. Para além disso,

como muitas pequenas e médias empresas não estão sujeitas a exigências regulatórias diretas, tendem a priorizar a operação diária em detrimento da sustentabilidade, não tendo ainda incentivos claros para realizar este tipo de reporte.

Assim, o uso de cláusulas contratuais sustentáveis, a definição de metas conjuntas com os fornecedores e a exigência de padrões ambientais elevados não são apenas mecanismos de mitigação climática, são também instrumentos estratégicos que permitem ao setor cimenteiro alinhar-se com os objetivos do Acordo de Paris, reduzir riscos operacionais, fomentar inovação na cadeia de valor e reforçar a sua competitividade num mercado cada vez mais regulado e exigente em termos ambientais.

Em suma, as cimenteiras ao promoverem formações ou dando assistência técnica e financeira aos fornecedores sobre tópicos que abordem a sustentabilidade nas diversas fases da cadeia de valor, têm impacto em algumas categorias do Âmbito 3 das cimenteiras. Na categoria 1, ao abordar temas como a sustentabilidade ambiental e boas práticas nos processos de produção, é possível comprar matérias-primas e recursos com menos emissões associadas. Para além disso, é possível incluir formações específicas sobre eficiência energética e a substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas de menor intensidade carbónica, com foco especial nos fornecedores associados à categoria 3. No caso da categoria 4, a capacitação incide essencialmente sobre os parceiros logísticos, incentivando a adoção de práticas de logística sustentável.

Paralelamente, se as empresas cimenteiras estabelecerem metas claras de sustentabilidade e sobre os fornecedores, e requisitos ambientais nos contratos celebrados com os mesmos, vai ter impacto nas categorias 1 e 2. Esta abordagem inclui a celebração de contratos com fornecedores que utilizam matérias-primas de menor intensidade carbónica, integrando cláusulas que incentivem ou obriguem à adoção de práticas sustentáveis, como o uso de materiais reciclados, a melhoria da eficiência energética dos equipamentos ou a redução da intensidade carbónica dos processos de fabrico. No que respeita à categoria 4, pode ser dada prioridade a fornecedores locais ou àqueles que recorrem a modos de transporte com menor pegada carbónica, reforçando o compromisso com uma cadeia de abastecimento mais sustentável.

Os exemplos apresentados demonstram que a sensibilização e o apoio técnico e financeiro aos fornecedores podem reduzir as emissões de GEE de Âmbito 3 na indústria cimenteira, principalmente devido ao facto destas medidas terem um foco principal na categoria 1, que atualmente é a categoria com mais peso das emissões de Âmbito 3 da indústria. Ao envolver

ativamente os seus parceiros de fornecimento na transição para práticas mais sustentáveis, as empresas cimenteiras conseguem não só mitigar as emissões associadas à aquisição de bens e serviços, ao consumo de energia, ao transporte e à gestão de resíduos, como também promover uma cadeia de valor mais resiliente e eficiente.

7.3. Hipótese 3- Inteligência artificial

A terceira questão de investigação (RQ3) prende-se com a necessidade de o setor cimenteiro inovar com o recurso às novas tecnologias de forma a ser mais sustentável ao longo da cadeia de valor. Para responder à RQ3 colocamos como hipótese o uso da IA como uma possível abordagem, explorando o seu potencial para otimizar processos, reduzir desperdícios, melhorar a eficiência energética e minimizar a pegada de carbono do setor cimenteiro. As empresas estão a recorrer cada vez mais à IA para reduzir as suas emissões de carbono de Âmbito 3, sendo que esta pode desempenhar um papel crucial ao permitir maior eficiência, transparência e otimização de processos, ajudando as empresas a alcançar metas de sustentabilidade.

No âmbito da indústria cimenteira, a IA pode ser utilizada na seleção de fornecedores, funcionando como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão. Através da utilização de algoritmos e filtros, a IA pode analisar e comparar diferentes fornecedores com base em diversos critérios, como a pegada de carbono dos seus processos de produção e transporte. Desta forma, é possível identificar e priorizar fornecedores que promovem escolhas mais sustentáveis ao longo da cadeia de valor. Esta abordagem não só contribui diretamente para a descarbonização das emissões de Âmbito 3, como também incentiva os fornecedores a adotarem práticas mais sustentáveis.

A Unilever através da implementação de uma plataforma digital de rastreamento e gestão de sustentabilidade, consegue identificar, com maior precisão, quais os fornecedores com maior intensidade carbónica e intervir com orientações específicas. Esta iniciativa teve impacto direto na categoria 1, uma vez que permitiu reduzir em 15% as emissões associadas à produção de ingredientes agrícolas, como óleos vegetais e matérias-primas alimentares (Uniliver, 2023).

Esta tecnologia também contribui para melhorar a categoria 3, ao permitir avaliar e comparar a intensidade energética dos processos agrícolas e industriais utilizados pelos fornecedores. Ao selecionar parceiros que utilizam práticas agrícolas regenerativas, fontes

renováveis de energia ou tecnologias de baixo carbono, a Unilever consegue diminuir significativamente as emissões associadas à produção e transformação dessas matérias-primas.

Além disso, a análise granular proporcionada pela IA oferece maior visibilidade sobre o transporte, fertilizantes e uso da terra, com reflexos na categoria 4, permitindo ajustes logísticos e estratégias de aquisição mais sustentáveis. Por exemplo, a empresa pode optar por fornecedores mais próximos geograficamente ou por meios de transporte com menor intensidade carbônica.

No setor cimenteiro, a IA pode ser utilizada para monitorizar e analisar os dados de emissões de cada fornecedor ao longo da cadeia de fornecimento. Por exemplo, ao avaliar fornecedores de matérias-primas, como o calcário, a argila ou materiais alternativos, a IA pode identificar aqueles que utilizam fontes de energia renovável, tecnologias de baixo carbono ou processos de produção mais eficientes. Ao integrar esses dados em plataformas de rastreamento da cadeia de valor, as empresas de cimento podem priorizar os fornecedores que apresentam menor impacto ambiental, incentivando práticas mais sustentáveis em toda a cadeia de fornecimento, tendo um impacto direto na categoria 1 do Âmbito 3. Por exemplo, ao optar por fornecedores que utilizam práticas de baixo impacto ou fontes de energia renovável, a indústria cimenteira pode reduzir significativamente as emissões associadas à extração e transformação dos materiais, diminuindo sua pegada de carbono.

Já na categoria 3, a IA pode analisar os processos energéticos dos fornecedores, ajudando a identificar aqueles que dependem de fontes de energia mais limpas e utilizam práticas mais eficientes em termos energéticos. Ao selecionar fornecedores que utilizam biomassa ou outras fontes renováveis, a indústria cimenteira pode reduzir as emissões de GEE associadas ao consumo de energia na produção de cimento, que é uma das maiores fontes de emissões do setor.

A IA também pode desempenhar um papel fundamental na melhoria da eficiência logística, especialmente na otimização das rotas de transporte. Através da análise de dados e da utilização de algoritmos, a IA é capaz de identificar os percursos mais eficientes (Silvia et al., 2024). Esta otimização permite reduzir significativamente as distâncias percorridas pelos veículos, diminuindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de carbono associadas a estas operações.

No setor da logística, a DHL tem vindo a implementar soluções baseadas em IA como parte da sua estratégia para reduzir as emissões de Âmbito 3, particularmente associadas ao transporte de mercadorias realizado por terceiros e outras atividades indiretas na sua cadeia de valor. A

empresa recorre a sistemas inteligentes que analisam em tempo real os padrões de procura, tráfego, condições meteorológicas e disponibilidade de recursos logísticos, otimizando assim as rotas dos seus veículos de transporte. Esta abordagem permitiu reduzir significativamente o número de quilómetros percorridos, o tempo de entrega e o consumo de combustível fóssil. Como resultado, a DHL reporta uma redução de cerca de 30% nas emissões de carbono associadas ao transporte de mercadorias a montante (DHL, 2025).

Esta melhoria tem um impacto direto na categoria 4, uma vez que reduz a pegada carbónica dos fluxos logísticos externos contratados pela empresa, como transportadoras e operadores de carga. Ao reduzir as distâncias e aumentar a eficiência das entregas, também se verifica um impacto positivo nesta categoria, pois os produtos chegam com menor carga emissiva associada ao seu transporte.

Além disso, a recolha e análise de dados gerados por sensores e sistemas de rastreamento permitem à DHL avaliar o desempenho ambiental dos seus fornecedores de transporte, o que facilita a seleção de parceiros com melhores práticas de eficiência energética e adoção de veículos de baixas emissões. Esta prática contribui ainda para influenciar positivamente a categoria 2, na medida em que a empresa opta por frotas e infraestruturas mais sustentáveis no longo prazo (DHL, 2025).

A Maersk, uma das maiores empresas de logística do mundo, tem feito avanços significativos na redução das suas emissões de GEE de Âmbito 3, com foco na otimização do consumo de combustível dos seus navios. A empresa recorreu à IA para implementar uma estratégia inovadora que analisa dados em tempo real, ajustando a velocidade média e as rotas dos seus navios com base em vários parâmetros, como as condições meteorológicas, tráfego marítimo e outros fatores logísticos (Maersk, s.d.).

A aplicação desta tecnologia permitiu à Maersk melhorar a eficiência no consumo de combustível, ao ajustar a operação das embarcações, reduzindo o desperdício de energia e o impacto ambiental. Como resultado, a empresa conseguiu diminuir em aproximadamente 20% as suas emissões de CO₂, uma redução significativa que tem impacto direto na categoria 4 (Maersk, s.d.).

Esta estratégia de digitalização e otimização energética não só contribui para as metas de sustentabilidade da Maersk, como também reduz a pegada de carbono associada à sua cadeia de fornecimento, ao diminuir as emissões de transporte indiretas que são atribuídas à empresa. Além

disso, ao reduzir o consumo de combustíveis fósseis e melhorar a eficiência das operações marítimas, a Maersk também impacta positivamente a categoria 1, ao diminuir as emissões associadas à produção e fornecimento de combustíveis.

Na indústria cimenteira, a utilização da IA na otimização logística pode ser implementada através da análise de dados em tempo real, para melhorar o planejamento das rotas de transporte de matérias-primas e produtos acabados. Através de algoritmos avançados, a IA é capaz de identificar os percursos mais eficientes, reduzindo as distâncias percorridas pelos veículos e o tempo de deslocamento. Isto resulta em menos consumo de combustível fóssil e, como consequência, em menores emissões de CO₂.

Por exemplo, ao adotar um sistema de IA semelhante ao da DHL, que já implementou tecnologias para otimizar as rotas de transporte, as emissões associadas ao transporte de matérias-primas e produtos acabados podem ser reduzidas. Ao diminuir a distância percorrida pelos caminhões e melhorar a gestão da frota, a cimenteira impacta diretamente a categoria 1, pois a utilização de rotas mais eficientes e de frotas mais sustentáveis contribui para reduzir a quantidade de emissões associadas à produção e fornecimento de recursos e matérias-primas. A IA pode ajudar a selecionar fornecedores mais eficientes e com menor impacto ambiental, influenciando a cadeia de abastecimento para garantir que as emissões do transporte sejam minimizadas, contribuindo para a categoria 4. Adicionalmente, a IA pode ser usada para monitorar em tempo real a eficiência dos veículos e otimizar o uso de combustível da própria empresa. Isso pode ser feito através de sensores inteligentes que permitem ajustar as operações logísticas e identificar falhas ou áreas de melhoria, resultando em menor consumo de combustível e menor emissão de gases poluentes na distribuição dos produtos da empresa, tendo um impacto direto na categoria 9.

Além disso, ao implementar IA para a otimização logística, as empresas podem também contribuir para reduzir as emissões na categoria 3, caso as tecnologias implementadas diminuam a necessidade de recursos energéticos adicionais para o transporte e a distribuição.

Outro exemplo do uso da IA é através de sistemas que permitem analisar os produtos, de forma a otimizar o processo de produção e o uso de matérias-primas.

No setor do comércio eletrônico, a Amazon tem adotado soluções baseadas em IA para reduzir as emissões relacionadas com o transporte, embalagens e operações de parceiros de negócio na cadeia de valor. Através do seu programa “*Frustration-Free Packaging*”, a Amazon utiliza algoritmos de *machine learning* para analisar dados sobre o tamanho, peso, fragilidade e

histórico de danos dos produtos. Este sistema recomenda embalagens otimizadas que utilizam menos material e ocupam menos espaço, o que contribui para reduzir o volume transportado e a quantidade de recursos utilizados na produção das embalagens. Estas iniciativas, juntamente com o uso de IA para a otimização das rotas logísticas, como o caso da DHL, contribuíram para uma redução de mais de 3 milhões de toneladas de materiais usados na embalagem desde 2015 (Amazon, 2024).

Esta prática tem impacto na categoria 1, na medida em que IA analisa dados sobre o peso, tamanho e fragilidade dos produtos para recomendar embalagens mais pequenas, leves e feitas com menos material. Isto permite usar menos plástico e cartão e reduzir o volume transportado, o que diminui as emissões da Amazon relacionadas com os materiais usados. A IA também ajuda a escolher fornecedores que tenham práticas mais sustentáveis.

Já na categoria 2, a IA ajuda a planear onde e como construir centros de distribuição, com a escolha de materiais e sistemas que emitam menos emissões. Também ajuda a gerir a frota de forma mais eficiente para reduzir o impacto ambiental. Por outro lado, na categoria 4, a IA otimiza as rotas dos veículos, considerando o trânsito, a distância e as condições meteorológicas, para reduzir o consumo de combustível. Com embalagens mais pequenas e leves, é possível transportar mais produtos por viagem, diminuindo o número de viagens necessárias.

Na indústria do cimento, as práticas baseadas em IA para otimizar o processo de produção e o uso de matérias-primas, podem ser aplicadas para reduzir as emissões de Âmbito 3. Na categoria 1, a IA pode ajudar a analisar e escolher matérias-primas alternativas com menor pegada carbónica, através da avaliação do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida. Além disso, a IA pode otimizar a quantidade e o tipo de embalagens usadas no transporte do cimento, ao recomendar soluções que utilizem menos material e sejam mais fáceis de reciclar, não só tendo um impacto na categoria 1, como também na categoria 12, referente ao tratamento das embalagens no seu fim de vida.

Na categoria 2, a IA pode ser usada para planear e construir instalações de produção e armazenagem mais eficientes, escolhendo locais, materiais e tecnologias que minimizem as emissões incorporadas.

No que diz respeito à categoria 4, a IA pode otimizar a forma de acondicionamento dos produtos, como sacos mais leves ou paletes mais compactas, permite transportar maior quantidade por viagem, reduzindo o número total de viagens necessárias. Além disso, a IA pode ajudar a

selecionar o modo de transporte mais eficiente, privilegiando, sempre que possível, o transporte ferroviário em detrimento do rodoviário.

Desta forma, a aplicação da IA na indústria do cimento também pode contribuir para a redução do uso de matérias-primas e embalagens, melhora a eficiência das infraestruturas e frotas e otimiza o transporte das matérias-primas e dos produtos finais. Estas ações permitem diminuir significativamente as emissões indiretas de Âmbito 3, alinhando o setor com as metas de sustentabilidade e descarbonização.

Assim, no âmbito da redução das emissões Âmbito 3 da indústria do cimento, a adoção da IA pode ter um potencial transformador neste setor.

Na indústria cimenteira, a IA pode ser uma ferramenta decisiva na seleção de fornecedores mais sustentáveis. Utilizando algoritmos que avaliam critérios ambientais, como a pegada de carbono dos processos produtivos e o uso de fontes renováveis, a IA permite identificar e priorizar fornecedores que apresentem menor impacto ambiental. Esta abordagem incentiva práticas mais verdes ao longo da cadeia de valor, contribuindo diretamente para a redução das emissões indiretas de Âmbito 3 associadas à extração e transformação das matérias-primas, o que tem impacto direto na categoria 1, categoria esta que tem o maior peso nas emissões de Âmbito 3 do setor cimenteiro.

Relativamente ao uso da IA na logística, permite otimizar as rotas de transporte das matérias-primas e produtos acabados, analisando dados em tempo real sobre trânsito, condições meteorológicas e disponibilidade de veículos para definir percursos mais eficientes. Além disso, a IA facilita a avaliação e seleção de parceiros logísticos com práticas de baixo impacto ambiental, contribuindo para a redução do consumo de combustível e das emissões associadas ao transporte. Esta gestão inteligente da logística reduz a pegada carbónica da cadeia de valor, alinhando o setor cimenteiro com metas de sustentabilidade e descarbonização, tendo impacto positivo na categoria 4, outra categoria com um peso significativo no Âmbito 3 desta indústria.

Por fim, no âmbito dos processos produtivos e otimização dos consumos, a IA possibilita a monitorização e análise detalhada do consumo energético e das emissões dos fornecedores, identificando oportunidades para melhorar a eficiência energética e substituir combustíveis fósseis por alternativas de menor intensidade carbónica. Ao otimizar o uso dos recursos e reduzir desperdícios, as cimenteiras podem diminuir significativamente a pegada de carbono associada à produção de cimento, promovendo a sustentabilidade ao longo de toda a cadeia de valor, tendo também um impacto direto nas categorias 1, 2 e 3.

Com base no exposto, podemos afirmar que a IA pode desempenhar um papel fundamental na descarbonização do setor cimenteiro, principalmente por ter um impacto positivo nas categorias com mais peso nas emissões indiretas da produção de cimento. A implementação de soluções baseadas em IA tem permitido otimizar processos produtivos, melhorar a eficiência energética e promover uma gestão mais sustentável dos recursos, o que se reflete numa diminuição do impacto ambiental da indústria.

8. Discussão de Resultados

Os resultados obtidos com o teste das três hipóteses delineadas neste estudo constituem uma base sólida para compreender como estratégias específicas podem contribuir para a redução das emissões de GEE, com especial enfoque no Âmbito 3, na indústria cimenteira. Esta secção visa aprofundar a interpretação crítica dos dados, analisando o impacto das soluções estudadas e as suas implicações práticas para a transformação sustentável do setor.

Hipótese 1 – Economia Circular: A primeira hipótese abordou o papel da economia circular como instrumento para mitigar as emissões indiretas da cadeia de valor. Os dados evidenciam que a incorporação de subprodutos industriais — como escórias ou cinzas volantes — na produção de cimento permite reduzir significativamente a dependência de matérias-primas virgens, cuja extração, transformação e transporte representam fontes relevantes de emissões de Âmbito 3. Verificou-se ainda que a valorização energética de resíduos e a adoção de matérias-primas alternativas locais podem contribuir para reduzir os impactos associados ao transporte e à deposição final em aterro, apesar de existirem desafios logísticos e normativos que devem ser considerados. Os impactos observados por categoria estão organizados na Tabela 3, a qual demonstra que as contribuições da economia circular se estendem a diversas fases do ciclo de vida, desde a aquisição de matérias-primas até ao fim de vida do produto. Estes resultados confirmam a validade da hipótese, reforçando que a circularidade, além de reduzir as emissões, potencia a resiliência operacional, diminui custos e promove a integração setorial com outras indústrias, num modelo mais sustentável e regenerativo.

Tabela 3- Impacto da economia circular nas categorias do Âmbito 3 do setor cimenteiro

Hipótese	Categoria	Impacto
Hipótese 1- Economia Circular	Categoria 1	A substituição de matérias-primas virgens por recicladas ou provenientes de sinergias industriais reduz as emissões associadas à extração e processamento de novos materiais.
	Categoria 3	A valorização energética dos resíduos reduz a dependência de combustíveis fósseis, diminuindo as emissões associadas à sua extração, refinação e transporte.

	Categoria 4	Uso de resíduos ou matérias-primas alternativas produzidas localmente pode reduzir as emissões do transporte. Porém, o impacto pode ser neutro ou negativo se as distâncias percorridas forem superiores que as dos materiais tradicionais, como o calcário.
	Categoria 5	A redução da quantidade de resíduos enviados para aterro, através da reutilização interna e valorização energética, evita emissões associadas ao processo de tratamento no seu fim de vida.
	Categoria 11	Menor impacto esperado, mas pode haver algum efeito indireto se os produtos resultantes das práticas circulares tiverem desempenho ambiental melhor durante o uso.
	Categoria 12	A integração de subprodutos e matérias recicladas facilita a reciclagem ou reaproveitamento no fim de vida dos produtos, reduzindo a necessidade de eliminação e as emissões associadas.

Hipótese 2 – Sensibilização dos Fornecedores: A segunda hipótese testada incidu sobre o impacto da sensibilização, capacitação e seleção estratégica de fornecedores como forma de mitigar as emissões indiretas ao longo da cadeia de abastecimento. Verificou-se que a formação técnica em sustentabilidade, combinada com a integração de critérios ambientais nos processos contratuais, pode levar à adoção de práticas mais eficientes do ponto de vista energético e ambiental. Estes mecanismos permitem não só reduzir emissões associadas à produção e fornecimento de matérias-primas, mas também fomentar uma cultura de responsabilidade ambiental partilhada. Os fornecedores tornam-se parceiros ativos na estratégia de descarbonização, contribuindo com inovação, redução de resíduos e otimização logística. A Tabela 4 ilustra os impactos específicos nas categorias do Âmbito 3, evidenciando os ganhos associados à introdução de cláusulas contratuais sustentáveis, à valorização de fornecedores locais e à incorporação de metas ambientais. A hipótese 2 é assim confirmada, revelando o potencial transformador de uma abordagem colaborativa e estruturada de gestão de fornecedores orientada para os ODS.

Tabela 4- Impacto da sensibilização dos fornecedores nas categorias do Âmbito 3 do setor cimenteiro

Hipótese	Categoria	Impacto
Hipótese 2- Sensibilização o dos fornecedores	Categoria 1	Redução das emissões associadas às matérias-primas e recursos adquiridos, através da promoção de boas práticas de produção, uso de matérias-primas de menor intensidade carbónica e cláusulas contratuais sustentáveis.
	Categoria 2	Inclusão de requisitos ambientais nos contratos com fornecedores de bens de capital, como eficiência energética de equipamentos e menor intensidade carbónica nos processos de fabrico.
	Categoria 3	Formação sobre eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis por alternativas de baixa emissão, direcionada aos fornecedores relacionados com energia e combustíveis.
	Categoria 4	Capacitação dos parceiros logísticos, promovendo práticas de logística sustentável, uso de transporte de baixa emissão e preferência por fornecedores locais.
	Categoria 5	Incentivo à gestão sustentável de resíduos pelos fornecedores, promovendo a redução da geração de resíduos e práticas como a reciclagem ou reutilização de materiais.

Hipótese 3 – Inteligência Artificial: A terceira hipótese analisou o potencial da IA como instrumento de apoio à descarbonização, com foco na otimização de processos e cadeias de fornecimento. Através de algoritmos de aprendizagem automática, verificou-se a possibilidade de monitorizar e antecipar consumos energéticos, otimizar rotas logísticas e identificar fornecedores com menor pegada carbónica, permitindo intervenções preventivas e mais eficazes. A IA revelou-se ainda útil na melhoria da eficiência operacional, na redução de ineficiências e desperdícios e na automatização de decisões estratégicas com base em grandes volumes de dados. Estes ganhos não se limitam ao plano ambiental: traduzem-se também em vantagens competitivas e económicas.

A Tabela 5 resume os impactos da IA por categoria de emissão de Âmbito 3. A análise confirma que a aplicação de IA é particularmente eficaz nas áreas de transporte, gestão energética e seleção de fornecedores, validando assim a hipótese 3. Este resultado reforça a ideia de que a transformação digital pode ser um acelerador da transição ecológica da indústria cimenteira.

Tabela 5- Impacto da inteligência artificial nas categorias do Âmbito 3 do setor cimenteiro

Hipótese	Categoria	Impacto
Hipótese 3- Uso de IA	Categoria 1	A IA permite selecionar fornecedores com menor pegada de carbono e uso de fontes renováveis e identificar oportunidades de melhoria nos processos de produção de matérias-primas com menor intensidade carbónica.
	Categoria 2	Através da monitorização inteligente, é possível identificar equipamentos mais eficientes energeticamente, promovendo escolhas sustentáveis na aquisição de bens de capital.
	Categoria 3	A IA permite monitorizar e otimizar o consumo energético dos fornecedores, sugerindo substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia com menor intensidade carbónica.
	Categoria 4	Otimização de rotas de transporte com base em dados em tempo real, escolha de parceiros logísticos com práticas sustentáveis, redução do consumo de combustível e da pegada carbónica associada ao transporte.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam a viabilidade das três hipóteses estudadas. Cada uma das estratégias — economia circular, sensibilização de fornecedores e uso de IA — mostrou-se eficaz de forma isolada, mas também complementar às demais, reforçando que a descarbonização do setor requer uma abordagem integrada e multi-alavanca.

Estas estratégias alinham-se com os principais objetivos dos roteiros europeus e nacionais de neutralidade carbónica, contribuindo não só para a redução das emissões, mas também para o reposicionamento da indústria cimenteira como um agente ativo na transição para um modelo económico mais sustentável, competitivo e responsável.

9. Conclusões

A indústria cimenteira é, à escala global, uma das atividades mais intensivas em carbono, sendo responsável por uma fração significativa das emissões de CO₂ associadas à atividade industrial. Esta realidade coloca o setor perante o imperativo de acelerar a sua transição para um modelo de desenvolvimento mais sustentável, alinhado com os compromissos internacionais de descarbonização e os ODS. A pressão regulatória, aliada à crescente exigência dos mercados e da sociedade civil, obriga o setor a reinventar-se e a adotar soluções inovadoras que viabilizem a redução efetiva das suas emissões, particularmente das emissões indiretas de Âmbito 3.

O objetivo central desta dissertação consistiu em identificar e analisar estratégias que permitam tornar a cadeia de valor da indústria cimenteira mais sustentável, com vista à mitigação das suas emissões de GEE. A abordagem metodológica, baseada no modelo hipotético-dedutivo, permitiu testar três hipóteses relacionadas com a adoção de práticas de economia circular, a sensibilização e seleção de fornecedores, e a incorporação de tecnologias de IA. Estas hipóteses foram formuladas a partir de três questões de investigação específicas e sustentadas numa revisão aprofundada da literatura científica e prática.

Relativamente à RQ1 – Como pode a indústria cimenteira intensificar a incorporação de matérias-primas recicladas? Concluiu-se que a economia circular representa uma alavanca estratégica essencial para a transformação do setor. A validação da Hipótese 1 (H1) mostrou que a adoção de práticas como a substituição do clínquer por subprodutos industriais e a reutilização de materiais residuais pode reduzir substancialmente as emissões associadas à extração, transporte e processamento de matérias-primas virgens. Para além dos benefícios ambientais, estas práticas potenciam sinergias intraindustriais, reduzem custos operacionais e reforçam a resiliência da cadeia de abastecimento. Assim, a economia circular afirma-se como uma abordagem integrada que alia eficiência, inovação e sustentabilidade.

No que se refere à RQ2 – Como a seleção e sensibilização de fornecedores contribui para a redução das emissões do Âmbito 3 na indústria cimenteira? Os resultados obtidos confirmaram a validade da Hipótese 2 (H2). Verificou-se que a colaboração com fornecedores e a inclusão de critérios ambientais nos processos de seleção e contratação têm um papel determinante na redução das emissões indiretas. A formação contínua, o acompanhamento técnico e a definição de metas ambientais nos contratos foram identificadas como instrumentos eficazes para induzir mudanças comportamentais e operacionais nos parceiros da cadeia de valor. Este envolvimento gera não só

ganhos ambientais, como também reforça a transparência, a rastreabilidade e a reputação corporativa, fatores cada vez mais valorizados pelos *stakeholders*.

A RQ3 – Pode a indústria do cimento inovar de forma a reduzir as emissões de Âmbito 3? Foi também positivamente respondida com a validação da Hipótese 3 (H3). A IA revelou-se uma ferramenta poderosa para a identificação de ineficiências, a otimização de processos produtivos e logísticos, e a melhoria da tomada de decisão baseada em dados. A aplicação de IA permite, por exemplo, otimizar rotas de transporte, selecionar fornecedores com menor pegada carbónica e antecipar necessidades energéticas, promovendo assim uma gestão mais inteligente e sustentável das operações. Esta inovação tecnológica reforça o papel da digitalização como motor da transição energética e ecológica do setor.

A análise integrada dos resultados permite concluir que a articulação entre economia circular, colaboração com fornecedores e inovação tecnológica constitui uma via robusta para promover a descarbonização da cadeia de valor da indústria cimenteira. Estas três dimensões são complementares e interdependentes: a economia circular promove a eficiência no uso de recursos; a colaboração com fornecedores assegura a sustentabilidade a montante e a jusante do processo produtivo; e a inovação tecnológica, através da IA, reforça a capacidade de monitorizar, prever e otimizar emissões de forma contínua.

Neste sentido, o problema de investigação foi respondido de forma clara: a descarbonização da indústria cimenteira exige a implementação coordenada de estratégias sustentáveis, que combinem práticas circulares, parcerias responsáveis e tecnologia inteligente. Estes pilares sustentam um modelo económico mais sustentável, competitivo e responsável, capaz de gerar valor a longo prazo, mitigar riscos ambientais e posicionar o setor como líder na transição para uma economia de baixo carbono.

Concluindo, a indústria cimenteira dispõe das condições, ferramentas e conhecimento necessários para concretizar a sua transição sustentável. Para tal, é crucial fomentar ecossistemas colaborativos, onde empresas, fornecedores, instituições de investigação e decisores políticos alinhem esforços, partilhem dados e coproduzam soluções. Este estudo oferece orientações práticas para gestores, investigadores e decisores políticos, propondo-se como um contributo relevante para o desenvolvimento sustentável de um setor estratégico para a economia e para os objetivos climáticos globais.

9.1. Implicações Práticas e Teóricas

Os resultados desta investigação revelam implicações relevantes tanto para o plano prático, nomeadamente na gestão estratégica da cadeia de valor da indústria cimenteira, como para o plano teórico, ao enriquecer o corpo de conhecimento sobre sustentabilidade e descarbonização industrial. A análise realizada oferece um contributo estruturado para o desenho de políticas empresariais mais sustentáveis e para o desenvolvimento de abordagens académicas interdisciplinares que integrem variáveis ambientais, tecnológicas e de governança.

Do ponto de vista prático, este estudo fornece orientações claras e aplicáveis à realidade operacional das empresas do setor cimenteiro. Em primeiro lugar, evidencia-se o potencial da economia circular como uma alavanca essencial para a redução das emissões de CO₂, ao promover a valorização de resíduos, a substituição de matérias-primas virgens por subprodutos industriais e a integração de soluções locais de reaproveitamento de materiais. Estas práticas não apenas contribuem para a mitigação de emissões, como também reforçam a eficiência no uso de recursos e reduzem custos operacionais.

Em segundo lugar, salienta-se a importância da sensibilização e qualificação dos fornecedores como estratégia para expandir as práticas de sustentabilidade a montante da cadeia de valor. A inclusão de critérios ambientais em processos de contratação e a realização de ações de capacitação técnica fomentam a adoção de tecnologias mais limpas e práticas operacionais mais responsáveis por parte dos parceiros externos. Esta abordagem fortalece a coerência ambiental da cadeia de fornecimento, contribuindo de forma direta para a redução das emissões de Âmbito 3.

Em terceiro lugar, a investigação mostra que a IA pode desempenhar um papel decisivo na gestão eficiente e inteligente das emissões. A aplicação de algoritmos preditivos, sistemas de monitorização em tempo real e modelos de apoio à decisão permite não só otimizar processos internos e logísticos, como também selecionar fornecedores com menor pegada carbónica e monitorizar indicadores de desempenho ambiental. Este nível de sofisticação tecnológica oferece às empresas ferramentas objetivas para decisões baseadas em dados e orientadas para metas climáticas.

Do ponto de vista teórico, este trabalho contribui significativamente para a literatura sobre descarbonização e sustentabilidade na indústria, em particular no setor cimenteiro. A investigação valida empiricamente que a conjugação entre economia circular, envolvimento estratégico com fornecedores e uso de tecnologias digitais constitui uma abordagem eficaz para reduzir as emissões

indiretas. Este estudo amplia, assim, a compreensão sobre como diferentes estratégias interligadas podem atuar de forma sinérgica na transformação de setores tradicionalmente intensivos em carbono.

Além disso, este estudo aprofunda o conceito de descarbonização ao enquadrá-lo numa lógica holística e sistêmica, em oposição a abordagens isoladas ou exclusivamente tecnológicas. A articulação entre práticas operacionais, relações interorganizacionais e ferramentas digitais revela-se essencial para alcançar resultados consistentes e escaláveis na mitigação das emissões. Este entendimento pode informar futuras investigações, tanto quantitativas como qualitativas, orientadas para explorar modelos integrados de sustentabilidade industrial.

Em suma, este trabalho contribui para aproximar a teoria da prática, oferecendo uma ponte sólida entre o conhecimento científico e as exigências do setor produtivo, e reforça a necessidade de abordagens multissetoriais e colaborativas na luta contra as alterações climáticas. A aplicação concreta destas estratégias poderá posicionar a indústria cimenteira como protagonista da transição das indústrias para uma economia neutra em carbono, assegurando não só o seu alinhamento com os compromissos climáticos globais, mas também a sua viabilidade económica e competitividade num cenário futuro cada vez mais orientado para a sustentabilidade.

9.2. Limitações do Estudo e Recomendações para Trabalhos Futuros

Apesar das contribuições relevantes e da estrutura metodológica cuidadosamente delineada, este estudo apresenta algumas limitações que devem ser reconhecidas e consideradas na interpretação dos resultados e das conclusões.

Em primeiro lugar, a análise baseou-se na observação de um número limitado de empresas e setores de referência, o que restringe a generalização dos resultados para a totalidade da indústria cimenteira, particularmente a nível global. A diversidade operacional, tecnológica e regulatória existente entre diferentes geografias pode influenciar significativamente a aplicabilidade das estratégias analisadas. Assim, os resultados devem ser interpretados tendo em consideração a especificidade do contexto nacional e o grau de maturidade ambiental das organizações envolvidas.

Em segundo lugar, identificou-se uma escassez de dados específicos e detalhados sobre as emissões de Âmbito 3 na indústria cimenteira. A carência de métricas padronizadas e de metodologias consolidadas para a medição deste tipo de emissões compromete a obtenção de uma

avaliação quantitativa mais robusta e limita a capacidade de comparar desempenhos entre empresas ou setores. Esta limitação decorre também da complexidade inerente à rastreabilidade das emissões indiretas ao longo de cadeias de valor extensas e multifacetadas.

Além disso, a dependência de tecnologias emergentes, como a IA, representa um desafio prático em termos de custos de implementação, infraestrutura digital necessária e disponibilidade de competências técnicas especializadas. Estes fatores são particularmente relevantes em mercados emergentes ou em organizações com menor capacidade de investimento em inovação, o que pode limitar a escalabilidade e eficácia das soluções propostas.

Deste modo, para futuras investigações, recomenda-se o desenvolvimento de estudos com amostras mais amplas e representativas, englobando empresas de diferentes dimensões, localizações geográficas e níveis de maturidade em sustentabilidade. Essa abordagem permitiria capturar uma visão mais abrangente da aplicação das alavancas de descarbonização em diferentes realidades organizacionais.

Adicionalmente, sugere-se a exploração de outras tecnologias emergentes, como o *blockchain*, com potencial para aumentar a transparência, a rastreabilidade e a integridade dos dados ao longo da cadeia de abastecimento. A integração dessas tecnologias com sistemas de IA pode reforçar a fiabilidade dos relatórios de sustentabilidade e promover práticas mais responsáveis e auditáveis.

Por fim, estudos longitudinais, que acompanhem ao longo do tempo a implementação das estratégias analisadas, poderiam oferecer uma perspectiva mais profunda sobre a sua eficácia real, as barreiras à adoção, os fatores críticos de sucesso e a capacidade de adaptação das organizações. Esses estudos permitiriam igualmente avaliar o impacto das políticas públicas, dos instrumentos de regulação e dos incentivos económicos no progresso rumo à neutralidade carbónica.

Assim, reforça-se a necessidade de uma agenda de investigação contínua, multidisciplinar e aplicada, que apoie a indústria cimenteira na construção de um modelo de desenvolvimento mais sustentável, competitivo e alinhado com os objetivos climáticos globais.

Referências

- Amado, I. (2021). *Nestlé Professional revela oito compromissos para o seu crescimento sustentável*. Executive Digest. <https://executivedigest.sapo.pt/noticias/nestle-professional-revela-oito-compromissos-para-o-seu-crescimento-sustentavel/>.
- Amazon. (2024). *How Amazon is improving packaging and boosting sustainability*. <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/how-amazon-is-reducing-packaging>.
- Anquetin, T., Coqueret, G., Tavin, B., & Welgryn, L. (2022). Scopes of carbon emissions and their impact on green portfolios. *Economic Modelling*, 115, 105951. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105951>.
- Antunes, M., Santos, R. L., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R. B., & Colaço, R. (2022). Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review. *Materials*, 15(1), 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>.
- Aquino, A. (2024). *A indústria do cimento como alternativa sustentável para destinação final dos resíduos recicláveis da construção civil*. [Dissertação de Mestrado].
- Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas (AICCOPN). (2025). *CONJUNTURA DA CONSTRUÇÃO | Janeiro 2025*. <https://www.aiccopn.pt/conjuntura-da-construcao-janeiro-2025/>.
- ATIC (2019). *Caracterização da Indústria*. <https://www.atic.pt/industria-caracterizacao/>.
- ATIC (2019). *Cimentar o futuro- Roteiro ATIC 2050 Neutralidade Carbónica*. <https://www.atic.pt/roteiro-2050-5/>.
- ATIC (2019). *Importância do sector para a Economia Nacional*. <https://www.atic.pt/industria-economia-nacional-2/>.
- BMW Group. (2022). *Revolution in the car industry: Parts made from recycled fishing nets*. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0403390EN/revolution-in-the-car-industry%3A-parts-made-from-recycled-fishing-nets>.
- BMW Group. (s.d.). *Circular economy*. <https://www.bmwgroup.com/en/sustainability/circular-economy.html>.
- Caracitas, R. L. (2022). *Otimização da composição do cimento rumo à neutralidade carbónica*. [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra].

- Carvalho, A., Zarelli, P., Dalarosa, B., & Vieira, A. (2022). Relação da indústria 4.0 com a sustentabilidade: uma revisão. *Revista E-Tech Tecnologias Para Competitividade Industrial - Issn - 1983-1838*, 15(1). <https://doi.org/10.18624/etech.v15i1.1197>.
- Cavalett, O., Watanabe, M. D., Voldsund, M., Roussanaly, S., & Cherubini, F. (2024). Paving the way for sustainable decarbonization of the European cement industry. *Nature Sustainability*, 7(5), 568-580.
- Cembureau. (2020). *Cementing the European Green Deal*. https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf.
- Cembureau. (2020). *REACHING CLIMATE NEUTRALITY ALONG THE CEMENT AND CONCRETE VALUE CHAIN BY 2050*. https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf.
- Cembureau. (2024). *Key facts & figures – June 2024*. <https://cembureau.eu/media/00ejjcfj/key-facts-figures-publication-june-2024.pdf>.
- Cimpor (2025). *Processo de fabrico de cimento*. <https://www.cimpor.com/cimento>.
- Cimpor (2025). *História*. <https://www.cimpor.com/historia>.
- Cimpor. (2024). *Relatório Integrado CIMPOR 2023*. CIMPOR Portugal Cabo Verde Operations, SGPS, S.A. https://www.cimpor.com/documents/20124/1174015/2023_CIMPOR_Relat%C3%B3rio_de_Sutentabilidade.pdf/858209ac-e40c-91bb-6c76-ecfae14f6376?t=1738085270576.
- Cimpor. (2025). *Neutralidade Carbónica*. <https://www.Cimpor.com/neutralidade-carbonica>
- Clauwaert, T., Foote, E., Kabir, L., Maksimainen, J., & Van Hoey, M. (2023). *The Âmbito 3 challenge: Solutions across the materials value chain*. McKinsey & Company.
- Costa, C., & Marques, J. C. (2018). Feasibility of eco-friendly binary and ternary blended binders made of fly-ash and oil-refinery spent catalyst in ready-mixed concrete production. *Sustainability*, 10(9), 3136. <https://doi.org/10.3390/su10093136>.
- Cruz, A. (2022). *Introdução ao ESG: meio ambiente, social e governança corporativa*. Scortecci.
- Damineli, B. & John, V. (2012). Developing Low CO₂ Concretes: Is Clinker Replacement Sufficient? The Need of Cement Use Efficiency Improvement. *Key Engineering Materials*, 517, 342-351. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.517.342>.
- Deloitte. (2023). *Environmental progress*. <https://www.deloitte.com/pt/pt/issues/climate/sustainability.html>.

- Deloitte. (2025). *Cadeia de fornecimento sustentável e responsável*. <https://www.deloitte.com/pt/pt/about/governance/global-impact-report/sustainable-and-responsible-supply-chain.html>.
- Demarchi, M. P., Guercio, M. J., & Sierra, E. J. (2023). Desafios à implementação de compras públicas sustentáveis: Uma revisão integrativa. *Anais do XII Congresso Internacional de Conhecimento e Inovação (CIKI)*. <https://doi.org/10.48090/ciki.v1i1.1270>.
- DHL. (2025). *Sustainability*. <https://www.dhl.com/pt-pt/home/sustainability.html>.
- DHL. (2025). *The key to green logistics could be this superfast route optimization algorithm*. <https://lot.dhl.com/the-key-to-green-logistics-could-be-this-superfast-route-optimization-algorithm/>.
- Ecogen. (2023). *Ecogen Brasil implementa biodigestor em fábrica da Unilever em Pouso Alegre*. <https://www.ecogenbrasil.com.br/biodigestor-fabrica-da-unilever/>.
- Electrocholo. (2024). *Nestlé amplia la capacidad de producción de vapor de la caldera de biomasa de su fábrica cántabra*. <https://electrocholo.com/nestle-amplia-la-capacidad-de-produccion-de-vapor-de-la-caldera-de-biomasa-de-su-fabrica-cantabra/>.
- European Commission. (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. *The European Green Deal*.
- EY. (2023). *Caminhos para a redução de emissões do Escopo 3*. https://www.ey.com/pt_br/cop/caminhos-para-a-reducao-de-emissoes-do-escopo-3.
- Franco, M. P. V., Carvalho, M. M. d., Filho, S. C. L., Magalhães, A. S., & Domingues, É. P. (2023). Impactos econômicos da proposta brasileira na cop21: uma abordagem de equilíbrio geral computável. *Pesquisa E Planejamento Econômico (PPE)*: V. 52, N. 01, Abr. 2022., 52(1), 171-204. <https://doi.org/10.38116/ppe52n1art6>.
- Frías, M., Monasterio, M., Moreno-Juez, J. Physical and Mechanical Behavior of New Ternary and Hybrid Eco-Cements Made from Construction and Demolition Waste. *Materials*. 2023; 16(8):3093. <https://doi.org/10.3390/ma16083093>.
- GEA. (2024). *Annual report 2024*. <https://cdn.gea.com/-/media/investors/annual-report/2024/annual-report-2024-en.pdf?rev=db94f76a1f07427baf1ceee2811d6d67>.

- GEA. (2024). *Corporate climate action: 3 steps to reduce Scope 3 emissions*. <https://www.gea.com/en/stories/corporate-climate-action-three-steps-to-reduce-scope-3-emissions/>.
- Guimarães, P. A., Tamura, S., & Costa, M. (2023). The cement industry in accordance with the UN Sustainable Development Goals through the CSH seeds technology: A critical review. *Terra@Plural*, 17, 1-15. <https://doi.org/10.5212/TerraPlural.v.17.2322485.011>.
- Habert, G., Miller, S., John, V., Provis, J., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 559 - 573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.
- Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220-6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>.
- Henkel. (2024). *Henkel defines net zero targets*. <https://www.henkel.com/investors-and-analysts/investor-relations-news/2024-11-04-henkel-defines-net-zero-targets-1996782>.
- Henkel. (2025). *Henkel makes further progress across all areas of its sustainability strategy*. <https://www.henkel.com/investors-and-analysts/investor-relations-news/2025-03-11-henkel-makes-further-progress-across-all-areas-of-its-sustainability-strategy-2044526>.
- Hettler, M., & Graf-Vlachy, L. (2024). Corporate scope 3 carbon emission reporting as an enabler of supply chain decarbonization: A systematic review and comprehensive research agenda. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 263-282. <https://doi.org/10.1002/bse.3486>.
- Ibáñez-Gosálvez, J., Real-Herrera, T., & Ortega, J. M. (2021). Performance of Mortars Made Using Ternary Binders with Addition of Slag, Fly Ash and Limestone Exposed to a Real Environmental Condition Compatible with Exposure Class XC3. *Materials*, 14(20), 5937. <https://doi.org/10.3390/ma14205937>.
- IEA – International Energy Agency. (2023). *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris: IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>.

- Ige, O. E., Von Kallon, D. V., & Desai, D. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(3), 579-597. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>.
- Imarc (2024). *Global Cement Market to Reach US\$ 629.9 Billion by 2033, Stimulated by Growing Government Investments in Infrastructure Projects*. <https://www.imarcgroup.com/global-cement-market>.
- INEGI. (2024). *Simbiose industrial: mais colaboração, mais circularidade e menos resíduos*. <https://www.inegi.pt/pt/noticias/simbiose-industrial-mais-colaboracao-mais-circularidade-e-menos-residuos/>.
- Jain, A. (2023). Analysing the Âmbito 3 Emissions of the Cement Industry. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(3), 1-17. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i03.23951>
- Jiang, K., Yu, H., Sun, Z., Lei, Z., Li, K., & Wang, L. (2024). Zero-emission cement plants with advanced amine-based CO₂ capture. *Environmental Science & Technology*, 58(16), 6978-6987. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00197>
- Kasperzak, R., Kureljusic, M., Reisch, L., & Thies, S. (2023). Accounting for carbon emissions—Current state of sustainability reporting practice under the GHG protocol. *Sustainability*, 15(2), 994. <https://doi.org/10.3390/su15020994>
- Koch, A., Rengel, R., Castanha, E., & Gasparetto, V. (2022). Avaliação socioambiental de fornecedores a partir dos relatórios de sustentabilidade de empresas do ISE B3. *Sociedade, Contabilidade e Gestão*, 17(2), 114–130. https://doi.org/10.21446/scg_ufrj.v0i0.51116.
- Krainer, J., Krainer, C., & Romano, C. (2022). *Vantagem de custo de transação na criação de capital social em empresas de construção civil: uma abordagem relacional*. In Anais do Congresso. <https://doi.org/10.37885/978-65-5360-142-0>.
- Li, M., Wiedmann, T., & Hadjikakou, M. (2019). Enabling full supply chain corporate responsibility: Âmbito 3 emissions targets for ambitious climate change mitigation. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 400-411. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05245>
- Lim, C., Jung, E., Lee, S., Jang, C., Oh, C., & Shin, K. N. (2020). Global trend of cement production and utilization of circular resources. *Journal of Energy Engineering*, 29(3), 57-63. <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.3.057>.
- Longo, P. (2023). *Carbonização Tradicional e Hidrotérmica de Combustíveis Derivados de Resíduos com Vista à sua Valorização Energética um Contributo para a Gestão Sustentável de Resíduos*

e para a Economia Circular [Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa].

Maersk. (s.d.). *All the way to zero*. <https://www.maersk.com/sustainability/all-the-way-to-net-zero>.

Martini, M., & Schreiber, D. (2025). ESG (Environmental, Social, and Governance) e desenvolvimento sustentável: governança corporativa e impactos sociais no Brasil. *COLÓQUIO - Revista do Desenvolvimento Regional*, 28-42. <https://doi.org/10.26767/coloquio.222025.3648>.

Martins, M. S. (2022). *Otimização do consumo de matérias-primas na pedreira no processo de fabrico de cimento* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa].

Meddah, A., Chikouche, M. A., Yahia, M., Deghfel, M., & Beddar, M. (2022). The efficiency of recycling expired cement waste in cement manufacturing: a sustainable construction material. *Circular Economy and Sustainability*, 2(3), 1213-1224. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00161-1>.

Medeiros, E. (2020). The territorial dimension of the united nations sustainable development goals. *Area*, 53(2), 292-302. <https://doi.org/10.1111/area.12681>.

Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., & Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10), 1398-1411. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.011>.

MIT Sloan Management Review. (2025). *The way to net zero: Reducing emissions takes teamwork*. <https://sloanreview.mit.edu/article/the-way-to-net-zero-reducing-emissions-takes-teamwork/>.

Nestlé Portugal. (s.d.). *O que faz a Nestlé para combater o desperdício de embalagens de plástico?*. <https://empresa.nestle.pt/ambiente/desperdicio-embalagens-plastico>.

Neves, A., Oliveira, E., & Silva, T. (2023). Análise comparativa da carbonatação no ciclo de vida e da cura carbônica de argamassas mistas com uso de biocarvão para sequestro de carbono. <https://doi.org/10.46421/enarc.v8i00.2997>.

Normative. (2024). *Upstream and downstream emissions, explained*. Normative. <https://normative.io/insight/upstream-downstream-emissions/>.

Nteta, A., & Mushonga, J. (2021). Drivers and barriers to green supply chain management in the South African cement industry. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 15. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v15i0.571>.

- Oguntola, O & Simske, S. (2023). Continuous Assessment of the Environmental Impact and Economic Viability of Decarbonization Improvements in Cement Production. *Resources* 2023, 12 (8), 95. <https://doi.org/10.3390/resources12080095>.
- Oliveira, M., Oliveira, G. V., & Moura, B. F. (2023). Monitoramento através de sensores das emissões de gases do efeito estufa na indústria cimenteira: uma revisão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(5), 51-59. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v9i5.42697>.
- Oliveira, W., Tinoco, J., Claro, J., & Sanches, C. (2019). Aferição do grau de responsabilidade social empresarial em MPEs de Jundiaí e região. *Revista Organizações em Contexto*, 15(29), 125–153. <https://doi.org/10.15603/1982-8756/roc.v15n29p125-153>.
- Our World in Data (2024). *Cement production, 1900 to 2023*. <https://ourworldindata.org/explorers/minerals?Type=Processing&Metric=Production&Mineral=Cement&Share+of+global=false>.
- Oyewo, B., Taurigana, V., Tawiah, V., & Aju, O. (2024). Impact of country governance mechanisms on carbon emissions performance of multinational entities. *Journal of Environmental Management*, 352, 120000. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120000>.
- Pamenter, S., & Myers, R. (2021). Decarbonizing the cementitious materials cycle: A whole-systems review of measures to decarbonize the cement supply chain in the UK and European contexts. *Journal of Industrial Ecology*, 25, 359 - 376. <https://doi.org/10.1111/jiec.13105>.
- Parlamento Europeu (2023). *Economia circular: definição, importância e benefícios*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>.
- Piazza, C. (2023). Transformando o futuro sustentável: os impactos revolucionários da inteligência artificial nas tecnologias verdes. *Revista De Tecnologia & Gestão Sustentável*, 2(7). <https://doi.org/10.17271/rtgs.v2i7.4652>.
- Pisciotta, M., Pilorgé, H., Davids, J., & Psarras, P. (2023). *Opportunities for cement decarbonization*. *Cleaner Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100667>.
- Poudyal, L., & Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment and Sustainability*, 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>.
- Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico* (2. ed., Vol. 2). Novo Hamburgo: Editora Feevale.

- Ravalison, J., Razafindrazanakolona, A. D., & Robijaona Rahelivololoniaina, B. (2023). How to Appropriate Sustainable Development Goals in Madagascar's Context. *Britain International of Exact Sciences (BioEx) Journal*, 5(2), 55-67. <https://doi.org/10.33258/bioex.v5i2.877>.
- Repsol. (2022). *Repsol e Lactalis Nestlé juntam-se para promover a circularidade das embalagens alimentares*. <https://sines.repsol.pt/pt/atualidade/notas-de-imprensa/022/repsol-e-lactalis-nestle-juntam-se-para-promover-a-circularidade/index.cshtml>.
- Rocha, P. & Cardeira, A. (2021). Transição Energética e Descarbonização: eficiência, competitividade, inovação na Indústria de Cimento Nacional e Políticas Públicas de apoio à sua transformação. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. nº16, 117-126.
- Rodrigues, R., & Veríssimo, M. (2021). Indústria, serviços e crescimento: evidências para o Brasil no período de 1996 a 2020. *Revista Brasileira de Economia e Indústria*, 20(4), 715-730. <https://doi.org/10.5151/v-enei-715>.
- Sanjuán, M. Á., Andrade, C., Mora, P., & Zaragoza, A. (2020). Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements. *Applied Sciences*, 10(2), 646. <https://doi.org/10.3390/app10020646>.
- Santos, M. (2024). *Plano de monitoramento da qualidade do ar como ferramenta para a gestão ambiental e avaliação de impacto socioambiental aplicado a uma indústria cimenteira*.
- Saravanakumar, R., Elango, K. S., Revathi, V., & Balaji, D. (2024). Influence of aggressive environment in macro and microstructural properties of bottom ash geopolymer concrete. *Sustainability*, 16(5), 1732. <https://doi.org/10.3390/su16051732>.
- Schmidt, L., Delicado, A., & Junqueira, L. (2021). Políticas de alterações climáticas em Portugal: posicionamentos e redes de relações dos atores institucionais. *Análise Social*, 56(3 (240)), 470–497. <https://www.jstor.org/stable/27136165>.
- Secil. (2024). *Relatório anual 2023*. <https://www.secil-group.com/pt/sustentabilidade/sustentabilidade-secil>.
- Silva, M., Correia, Í., Silva, L., Rodrigues, W., & Bazzoli, J. (2022). Revisão bibliométrica: o papel da inteligência artificial na implementação dos objetivos de desenvolvimento sustentável em tempos de covid-19. *Revista Baru - Revista Brasileira De Assuntos Regionais E Urbanos*, 8. <https://doi.org/10.18224/baru.v8i1.9145>.

- Sundaramoorthy, S., Kamath, D., Nimbalkar, S., Price, C., Wenning, T., & Cresko, J. (2023). Energy efficiency as a foundational technology pillar for industrial decarbonization. *Sustainability*, 15(12), 9487. <https://doi.org/10.3390/su15129487>.
- Thermo Fisher Scientific (2024). *O processo de fabricação do cimento*. <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/cimentos-avancados/o-processo-de-fabricacao-do-cimento/>.
- Turakulov, Z., Kamolov, A., Turakulov, A., Norkobilov, A., & Fallanza, M. (2023). Assessment of the decarbonization pathways of the cement industry in Uzbekistan. *Engineering Proceedings*, 37(1), 2. <https://doi.org/10.3390/ECP2023-14639>.
- Unilever. (2025). *Our climate transition action plan*. <https://www.unilever.com/sustainability/climate/our-climate-transition-action-plan/>.
- Uniliver. (2023). *How AI and digital help us innovate faster and smarter*. <https://www.unilever.com/news/news-search/2023/how-ai-and-digital-help-us-innovate-faster-and-smarter/>.
- UNRIC – Centro Regional de Informação das Nações Unidas para a Europa Ocidental. (2024). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. <https://unric.org/pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2016). *Cement Sector Âmbito 3 GHG Accounting and Reporting Guidance*.
- World Cement Association (2024). *Global Cement Industry Outlook: Trends and Forecast*. <https://www.worldcementassociation.org/blog/news/global-cement-industry-outlook-trends-and-forecasts>.
- World Population Review (2024). *Cement Production by Country 2024*. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cement-production-by-country>.
- Yosef, F. A., Juma, L., & Alatoom, M. (2023). Identifying and categorizing sustainable supply chain practices based on triple bottom line dimensions: evaluation of practice implementation in the cement industry. *Sustainability*, 15(9), 7323. <https://doi.org/10.3390/su15097323>.
- Zaman, M., & Mishra, P. (2023). Application of triangular fuzzy TOPSIS method for cement supplier selection for a construction firm in India. *Applied Research*, 4(1). <https://doi.org/10.46254/ap04.20230163>.