

PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR EM INDÚSTRIA DE CIMENTO: um estudo de caso no DF

ENNIO EDUARDO FURTADO MORETTI
UNB UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

EMILIA DE OLIVEIRA FARIA

GILMAR DOS SANTOS MARQUES
FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA DO DISTRITO FEDERAL (FAPDF)

Introdução

No contexto da produção de cimento, é possível verificar o quanto o processo produtivo do setor é danoso ao meio ambiente e à saúde humana, onde populações que moram próximas às fábricas e sua força de trabalho humano saem ainda mais prejudicadas (MAURY, 2012). Sabe-se que cerca de 5% das emissões antrópicas de CO₂ no mundo são causadas pela fabricação de cimento (WBCSD, 2010). No Brasil, a indústria de cimento é responsável por 24,9% das emissões de CO₂ de processos industriais em 2016 (BRASIL, 2020).

Problema de Pesquisa e Objetivo

O “Roadmap Tecnológico do Cimento”, traçado pela ABCP e pelo SNIC, traz diversas alternativas para a redução da emissão de carbono, que tangem principalmente os insumos utilizados na fabricação de cimento e a tecnologia envolvida na sua fabricação. Entre essas, estão as fontes de energia alternativas, enfatizando o coprocessamento como potencial solução para a redução da emissão de CO₂. Dessa forma, de modo a estabelecer conexões entre a Economia Circular e o cimento, o objetivo deste estudo é analisar as práticas da indústria do cimento a partir dos princípios da Economia Circular.

Fundamentação Teórica

A EC apoia-se em três princípios: i) preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis; ii) Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico; e iii) Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio. A fabricação de cimento é um processo que exige grande escala, quantidades consideráveis de recursos naturais, matérias-primas, combustíveis térmicos.

Metodologia

Quanto à abordagem, é uma pesquisa qualitativa, exploratória e descritiva. A estratégia de pesquisa adotada foi o estudo de caso. Além disso, também foram utilizadas a revisão sistemática da literatura para compreender o panorama atual da literatura sobre Economia Circular e o setor cimenteiro, e a pesquisa documental em sites eletrônicos, documentos institucionais e relatórios para complementar as informações coletadas nas entrevistas semiestruturadas.

Análise dos Resultados

A RSL e o estudo de caso da indústria cimenteira apontou diversas práticas da Economia Circular que podem otimizar o processo produtivo do cimento de modo a reduzir seu impacto ambiental. Além disso, há o interesse para que ocorram melhorias contínuas relacionadas a redução de emissão de CO₂ pelas fábricas, que reverbera como imagem positiva para a empresa perante o mercado, trazendo maior aceitação pelo público consumidor e, ocasionalmente, potencializando as receitas. No campo de custos, alternativas sustentáveis também foram apontadas devido ao potencial de reduzirem os gastos.

Conclusão

Enxerga-se na Economia Circular uma saída viável e promissora para que essas emissões sejam reduzidas ao máximo, de modo que haja um caminho em que convergem à eficiência industrial e à preservação do meio ambiente e seus recursos. O estudo apresentou um histórico, com aspectos, impactos e as ações da indústria de cimento, que demonstram de forma clara que existe um grande potencial para reduzir significativamente as emissões de CO₂ no setor. Todavia, preparar-se para que essas oportunidades sejam aproveitadas ao máximo exige altos investimentos financeiros e de tempo para as fábricas.

Referências Bibliográficas

ABCP. O encadeamento da indústria do cimento no Brasil. 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/o-encadeamento-da-industria-do-cimento-no-brasil-2/>. Acesso em: 23 mai. 2023
ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição. 2015. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf. Acesso em: 24 mar. 2023.
STAHEL, W. R. The circular economy. Mar. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/298909366_Circular_economy. Acesso em: 20 mar. 2023.

Palavras Chave

Economia Circular, Cimento, Setor cimenteiro

PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR EM INDÚSTRIA DE CIMENTO: um estudo de caso no DF

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material produzido pelo homem mais consumido do mundo, perdendo apenas para a água como a mais consumida no geral. É a base de toda obra, sendo que a sua utilização está diretamente relacionada ao nível de desenvolvimento de um país (MARTIRENA & SCRIVENER, 2015). Dentre seus componentes está o cimento, material que em seu estado líquido se molda com facilidade e em seu estado sólido é duro como pedra. Estima-se que em 2021 foram produzidos 4,4 Bilhões de toneladas de cimento, num contexto em que o Brasil foi o 7º país que mais produziu esse material (U.S. Geological Survey, 2022).

Grandes produções em uma indústria podem gerar grandes impactos em termos de sustentabilidade. No caso do cimento, não é diferente: o Cimento Portland (principal tipo de cimento produzido e comercializado) tem como matéria-prima o clínquer, que para ser produzido exige alta emissão de CO₂. Para a fabricação de uma tonelada de clínquer, emite-se, aproximadamente, 900 kg de CO₂ (MOREIRA & REGO, 2020).

Apesar desses números, a indústria nacional vem somando esforços para a redução de emissão de gases do efeito estufa, sendo responsável por apenas 6% da emissão nacional (comparada a uma participação acima de 20% do PIB), sendo a indústria cimenteira responsável por 2,6% do total nacional (abaixo da média mundial, de 7%). Mesmo assim, está em curso a implementação de um “Roadmap Tecnológico do Cimento”, que tem como objetivo reduzir a emissão de CO₂ na produção de cimento até 2050 (ABCP, 2021).

Entre as alternativas para a redução da emissão de CO₂, está o coprocessamento, que consiste na recuperação simultânea de energia e a reciclagem de recursos minerais quando usados para substituir os combustíveis fósseis primários (como petróleo e carvão) em fornos de cimento (FREITAS & NOBREGA, 2014). Para isso, indústrias cimenteiras utilizam resíduos sólidos como palha de arroz, pneus usados, farinha e ossos de animais, serragem entre outros para substituir o Coque Verde de Petróleo (CVP), combustível responsável por 85% da produção de clínquer em 2014 (ABCP, 2021).

A atividade de coprocessamento é regulamentada pela resolução Conama 499/2020, que dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Portanto, é uma prática sustentável que corrobora para a lógica da Economia Circular (EC), que busca manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, por meio da retroalimentação do sistema de consumo (ELLEN MacARTHUR FOUNDATION, 2017; 2015). Essa vem sendo uma alternativa atraente em detrimento à Economia Linear (EL) de extração, transformação e descarte, dado que pode impulsionar tanto a inovação quanto a economia nos países em que é implementada.

No contexto da produção de cimento, é possível verificar o quanto o processo produtivo do setor é danoso ao meio ambiente e à saúde humana, onde populações que moram próximas às fábricas e sua força de trabalho humano saem ainda mais prejudicadas (MAURY, 2012). Sabe-se que cerca de 5% das emissões antrópicas de CO₂ no mundo são causadas pela fabricação de cimento (WBCSD, 2010). No Brasil, a indústria de cimento é responsável por 24,9% das emissões de CO₂ de processos industriais em 2016 (BRASIL, 2020).

O “Roadmap Tecnológico do Cimento”, traçado pela ABCP e pelo SNIC, traz diversas alternativas para a redução da emissão de carbono, que tangem principalmente os insumos utilizados na fabricação de cimento e a tecnologia envolvida na sua fabricação. Entre essas, estão as fontes de energia alternativas, enfatizando o coprocessamento como potencial solução para a redução da emissão de CO₂.

Dessa forma, faz-se necessária uma análise a respeito das conexões entre o setor cimenteiro e a EC. Esta pesquisa buscou responder a seguinte pergunta: quais são as relações entre a economia circular e a indústria do cimento?

Para responder ao problema proposto deste estudo foi estabelecido o seguinte objetivo geral: analisar as práticas da indústria do cimento a partir dos princípios da Economia Circular. A justificativa para a realização deste estudo baseia-se em diferentes preocupações, sendo que a principal delas é atender aos objetivos da Agenda 2030, além de reduzir o consumo de recursos naturais que está cada vez mais acelerado (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2022).

E a tendência é piorar, visto que as previsões indicam que o aumento populacional só será freado em 2064 (MURRAY, 2020) e que 75% da população ocupará espaços urbanos em 2050 (ELLEN MacARTHUR FOUNDATION, 2019). Logo, a forma e a velocidade do consumo dos recursos naturais se tornam cada vez mais insustentáveis (SPANGENBERG, 2010).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Economia Circular (EC)

Stahel (2016) diferencia três sistemas de economia industrial: linear; circular e performance. A economia linear funciona como um rio, onde recursos naturais fluem até se tornarem produtos disponíveis para a venda. Após a venda, cabe ao consumidor as decisões em relação ao descarte (ou não) daquele produto. De acordo com o autor, esse sistema “[...] é eficiente em superar a escassez, mas perdulário no uso de recursos em mercados muitas vezes saturados”.

A economia circular é como um lago, onde os recursos são reaproveitados, gerando empregos e economizando energia. Em vez de puramente descartar, como num processo linear, a economia circular tenta buscar alternativas para que resíduos tenham alguma utilidade ao fim do uso desejado pelo usuário, aumentando a utilidade daquele produto que ele tem em mãos.

Por fim, a economia de performance foca no arrendamento ou compartilhamento de bens como serviços, onde os fabricantes mantêm a propriedade do produto, compartilhando-os com usuários interessados em utilizá-lo (STAHHEL, 2016). Pensar a produção de modo linear é algo insustentável por si só, visto que a fonte de recursos (natureza) é finita (e cada vez mais escassa). Isso não significa que a EC traz perpetuidade aos recursos, mas sim traz a máxima utilidade que esses podem oferecer (BONCIU, 2014).

A EC vem como uma alternativa potencial e efetiva, que se caracteriza como uma economia restaurativa e regenerativa, na qual o foco é manter produtos, componentes e materiais no seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo. É concebida como um ciclo contínuo de desenvolvimento positivo e que funciona de forma efetiva em qualquer escala. Esse modelo vem em detrimento ao modelo “extrair, transformar, descartar”, o qual depende de grandes quantidades de materiais de baixo custo e fácil acesso. A EC apoia-se em três princípios: i) preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis; ii) Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico; e iii) Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio (ELLEN MacARTHUR FOUNDATION, 2015).

O desenvolvimento de uma EC exige uma mudança no comportamento do consumidor (PLANING, 2015), visto que este, ao adquirir um produto, terá em mãos a decisão de onde, como e quando descartar aquilo que comprou. No que se refere a empresas e governos, a transição para a EC pode ser baseada em um conjunto de seis ações: regenerar (Regenerate), compartilhar (Share), otimizar (Optimise), ciclar (Loop), virtualizar (Virtualize) e trocar (Exchange). Essas ações em inglês formam o anagrama ReSOLVE, modelo que possibilita a

geração de estratégias circulares e iniciativas voltadas para o crescimento. Essas ações em conjunto possibilitam prolongar a vida útil de ativos físicos, bem como promover a substituição do uso de recursos finitos por fontes renováveis. (ELLEN MacARTHUR FOUNDATION, 2015).

2.2 Cimento

Atualmente o Brasil conta com 91 fábricas produtoras, pertencentes a 23 grupos industriais, espalhadas em 80 municípios em 23 Estados brasileiros, empregando diretamente mais de 18.000 trabalhadores. Essas fábricas são capazes de produzir 94 milhões de toneladas por ano, suprimindo a demanda nacional, que foi de 64,5 milhões de toneladas em 2021 (SNIC, 2023).

2.2.1 Mercado

O consumo de cimento no Brasil está distribuído da seguinte maneira: 58% da produção é destinada à revenda, 20% a empresas concreteiras, 18% para construtoras e indústrias e 4% para outros tipos de consumidores (SNIC, 2023).

O mercado de cimento no Brasil possui 23 grupos industriais nacionais e estrangeiros, os quais possuem 91 fábricas distribuídas em 80 municípios brasileiros (SNIC, 2023). Os 10 grupos com maior capacidade instalada no Brasil são Votorantim Cimentos, Intercement, Nassau, LafargeHolcim, Mizu, CSN, Tupi, Ciplan, Itambé e CRH (CADE, 2019).

2.2.2 Fabricação

Os materiais de construção são de suma relevância histórica para a humanidade, tanto que dividimos os períodos históricos como “Idade da Pedra” ou “Idade do Bronze”, por exemplo. Nossos ancestrais utilizavam materiais conforme sua disponibilidade na natureza, sem customizá-los. Com o tempo as exigências do homem foram mudando, bem como os padrões requeridos. Logo, a pedra, a madeira e o barro deram espaço para materiais mais elaborados, como, por exemplo, o cimento (BAUER, 2019).

O cimento Portland constitui-se como o produto obtido pela pulverização de clínquer, que por sua vez é constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades (BAUER, 2019). O processo de produção consiste em moer as matérias primas no Moinho de Bolas até a obtenção de um pó bastante fino, que é armazenado num silo, com condições para sua conservação, até o momento de ser levado ao forno, numa temperatura próxima a 1.400°C. O resultado desta queima é o Clínquer, que sofrerá adições e será moído novamente, obtendo-se o Cimento Portland comercial (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A fabricação de cimento é um processo que exige grande escala, quantidades consideráveis de recursos naturais, matérias-primas, combustíveis térmicos e energia elétrica (KARSTENSEN, 2006). Boa parte do calcário (uma das matérias-primas) é perdida ao longo do processo de transporte até a britagem, de modo que as cimenteiras se concentram, principalmente, em locais próximos a minas de calcário, a fim de reduzir perdas (SNIC, 2023). A produção de Cimento Portland no Brasil é regulada pela NBR 16697, de 2018, a qual consolidou outras normas vigentes anteriormente. Nela, encontram-se os termos e definições sobre o Cimento Portland, bem como seus requisitos gerais e específicos.

2.2.3 Impacto Ambiental

A produção de cimento é uma das atividades que mais emite CO₂ no mundo (BENHELAL *et al*, 2013), onde 1 tonelada de clínquer é responsável pela emissão de 900 kg de CO₂ na atmosfera (MOREIRA & REGO, 2020), sendo, assim, responsável por,

aproximadamente, 5% a 7% da emissão antropogênica de CO₂ (CHEN *et al*, 2010). A emissão de CO₂ na produção de cimento está presente em diversos momentos, desde a preparação da matéria-prima até a moagem do clínquer (BENHELAL *et al*, 2013).

Benhelal (2013) traçou três estratégias que podem conter a emissão de dióxido de carbono nas fábricas de cimento, sendo essas: i) economia de combustível e energia; ii) separação e armazenamento de carbono; iii) utilização de materiais alternativos. Entretanto, há barreiras para a implementação dessas estratégias.

As estratégias citadas por Benhelal (2013) estão presentes no Roadmap Tecnológico do Cimento (ABCP, 2021) que estabelece, dentre outros objetivos, a redução do fator clínquer de 67% para 52% até 2050; o aumento da utilização de combustíveis alternativos de 15% para 55% até 2050 e; substituição de tecnologias usadas há mais de 40 anos. As principais barreiras de implementação dessas práticas se baseiam em questões financeiras (altos investimentos), exigências legais e ambientais, limitações técnicas, e disponibilidades regionais de insumos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Tipologia e descrição geral dos métodos de pesquisa

Os tipos mais comuns de pesquisa são exploratória, descritiva e explicativa (GIL, 2002). Visto que o objetivo geral deste trabalho foi “analisar as práticas da indústria do cimento a partir dos princípios da Economia Circular”, trata-se de uma pesquisa do tipo exploratória, visto que essas têm como objetivo o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Mas, ela se caracteriza como descritiva no momento que um dos objetivos específicos é “descrever o processo produtivo de uma indústria cimenteira do DF”

Quanto à abordagem, é uma pesquisa qualitativa, dada a subjetividade da questão que será descrita e visto que o ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados (SILVA e MENEZES, 2001). A estratégia de pesquisa adotada foi o estudo de caso, pois se propõe a explicar um fenômeno social contemporâneo de modo detalhado (Yin, 2017). Além disso, também foram utilizadas a revisão sistemática da literatura para compreender o panorama atual da literatura sobre Economia Circular e o setor cimenteiro, e a pesquisa documental em sítios eletrônicos, documentos institucionais e relatórios para complementar as informações coletadas nas entrevistas.

3.2 Revisão Sistemática da Literatura

Para analisar as práticas da indústria do cimento a partir dos princípios da Economia Circular foi necessário compreender inicialmente o panorama atual da literatura sobre EC e o setor cimenteiro. Galvão e Pereira (2014) conceituam a revisão sistemática da literatura como uma investigação focada em questão bem definida, que visa identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis. Esse tipo de revisão se distingue da revisão tradicional ou narrativa, as quais trazem informações gerais sobre o tema em questão, bem como se difere da integrativa, a qual utiliza diferentes delineamentos na mesma investigação e expressam a opinião do próprio autor.

Com o intuito de fazer com que a pesquisa seja replicável, os critérios adotados foram: a base de dados foi a Scopus, com o intuito de buscar artigos mais bem avaliados pela academia, em detrimento de outras bases que trazem uma maior quantidade de artigos, porém com menor qualidade no geral. Foram buscados apenas artigos publicados após 2018, com a intenção de ter informação mais atualizada quanto ao tema. O quadro 1 detalha os pormenores dessa revisão sistemática, explicitando fontes de pesquisa, recorte, palavras-chave com seus respectivos operadores booleanos e os critérios de aceitação para seleção dos artigos.

Quadro 1 - Resumo do protocolo de revisão sistemática da literatura

Pergunta de pesquisa	Quais as relações entre a economia circular e a indústria do cimento?
Fontes de consulta	Scopus
Recorte temporal	Publicações realizadas entre 2018 e 2022
Palavras-chave	“Circular Economy” AND “Cement”
Crítérios de aceitação	Publicações que dizem respeito tanto a Economia Circular quanto cimento (desde sua fabricação até sua utilização ou reutilização)
Crítérios de limitação	Publicações de artigos e trabalhos científicos sem limitação de área de estudo

Fonte: autores.

Finalizou-se a definição de critérios de exclusão com 43 revisões, que foram analisadas a fim de entender se elas iam ao encontro dos objetivos desse trabalho, que são explorar relações existentes e potenciais entre o setor cimenteiro e a Economia Circular e identificar a aplicação de práticas relacionadas à Economia Circular nas indústrias de cimento. Assim, 17 revisões tinham relação com o objetivo desse trabalho e foram submetidas à leitura aprofundada.

3.3 Caracterização do instrumento de pesquisa

Foi escolhida a entrevista semiestruturada, elaborada com base na revisão sistemática da literatura, visto que dentre os objetivos deste trabalho estão i) Descrever o processo produtivo de uma indústria cimenteira do DF; ii) Identificar práticas sustentáveis de uma indústria cimenteira do DF; e iii) Investigar possibilidades e barreiras à implantação dos princípios da EC no setor de cimento.

O quadro 2 apresenta o roteiro de perguntas que embasaram a entrevista, bem como apresenta o objetivo específico que cada pergunta buscou responder. Por ser um roteiro semiestruturado, novas perguntas se fizeram pertinentes ao longo da entrevista, buscando aprofundar nos temas abordados.

Quadro 2 - Roteiro de entrevista utilizado

Pergunta realizada	Objetivo específico envolvido
Quais ações voltadas para a sustentabilidade são realizadas pela empresa? Cite as principais.	Identificar práticas sustentáveis de uma indústria cimenteira do DF; identificar relações e práticas existentes e potenciais entre o setor cimenteiro e a EC.
Quais são os principais processos produtivos realizados pela empresa?	Descrever o processo produtivo de uma indústria cimenteira do DF.
Quais são ou foram as principais oportunidades para adoção da economia circular nas ações da empresa?	Identificar relações e práticas existentes e potenciais entre o setor cimenteiro e a EC; investigar oportunidades e barreiras à implantação dos princípios da EC no setor de cimento.
Quais são ou foram as principais barreiras para adoção da economia circular nas ações da empresa?	Identificar relações e práticas existentes e potenciais entre o setor cimenteiro e a Economia Circular; investigar oportunidades e barreiras à implantação dos princípios da EC no setor de cimento.

Fonte: autores.

3.4 Caracterização do setor cimenteiro no Brasil

A indústria de cimento no Brasil é responsável por 18 mil empregos diretos, com 91 fábricas controladas por 23 grupos empresariais. Em 2021, produziu 65,8 milhões de toneladas de cimento, tendo potencial para produzir 94 milhões de toneladas (SNIC, 2023). Estima-se que, para cada milhão de toneladas de cimento produzida, são criados 1.200 empregos diretos, indiretos e induzidos, R\$480 milhões são gerados em valor e R\$55 milhões são arrecadados em impostos (ABCP, 2022). Atualmente, a produção é autossuficiente, possuindo marcas e grupos nacionais, bem como grupos estrangeiros (Lafarge Holcim, Vicat, Secil etc.) (SNIC, 2023).

No que se refere aos impactos ambientais, sabe-se que para a fabricação de uma tonelada de clínquer, emite-se, aproximadamente, 900 kg de CO₂ (MOREIRA & REGO, 2020). Além disso, a indústria cimenteira é responsável por 5% das emissões antrópicas de CO₂ no mundo (WBCSD, 2010), sendo que ¼ das emissões de CO₂ de processos industriais vieram da indústria de cimento em 2016 (BRASIL, 2020). Os números chamam atenção, de modo que a indústria cimenteira mapeia há mais de 20 anos suas emissões de maneira organizada e reduziu 20% a sua emissão de CO₂ entre os anos de 1990 e 2015, tendo como meta reduzir as emissões em mais 33%, entre 2015 e 2050. Para isso, quatro grandes áreas irão auxiliar no atingimento dessa meta: matérias-primas alternativas, combustíveis alternativos, eficiência energética e captura de carbono (ABCP, 2022).

3.5 Caracterização da organização

Para a realização deste trabalho foi escolhida uma empresa do ramo cimenteiro localizada no Distrito Federal, atuante no segmento há mais de 50 anos. Para fins de identificação, será descrita como Empresa X.

3.6 Participantes da entrevista

Para a realização das entrevistas, foram buscados especialistas da área de produção da Empresa X. Logo, foram entrevistados dois profissionais ligados à produção: um analista ambiental e especialista em planejamento e controle mineral (descrito na entrevista como “Entrevistado A”) e outro analista em laboratório (descrito na entrevista como “Entrevistado B”). Para fins de pesquisa, os participantes foram mantidos em sigilo.

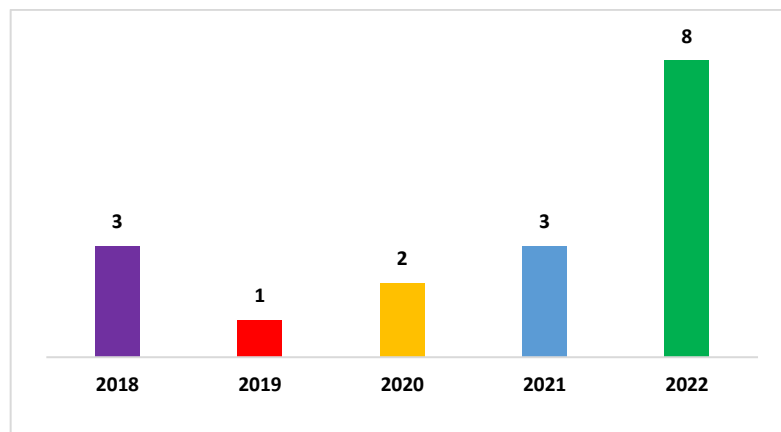
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da pesquisa, consolidando os dados da revisão sistemática da literatura referente ao tema e os correlacionando com os dados colhidos nas entrevistas realizadas.

4.1 Panorama atual da literatura sobre Economia Circular e Setor cimenteiro

A partir da revisão sistemática da literatura realizada, foi possível estabelecer um panorama geral acerca das publicações mais recentes que relacionam a EC e o cimento. Nota-se que o tema vem ganhando notoriedade ao longo do tempo, sendo que em 2022 houve mais pesquisas publicadas do que a soma das publicadas nos três anos anteriores.

FIGURA 1 – Quantidade de artigos publicados por ano



Fonte: autores.

Entre essas publicações, Índia, Nigéria e Suíça destacam-se com duas publicações por país. Já Argentina, Áustria, Bélgica, Catar, Egito, Estados Unidos, Itália, Malásia, Portugal, Reino Unido e Romênia contribuem com apenas uma publicação por país.

4.2 Relações e práticas existentes e potenciais entre o setor cimenteiro e a EC

A motivação da pesquisa está ligada ao fato de a produção de cimento ser uma atividade altamente responsável pela emissão antropogênica de CO₂ na atmosfera, sendo responsável por, aproximadamente, 5% a 7% desta (CHEN et al, 2010). Por isso, a abordagem da economia circular se torna importante e urgente para essa indústria.

Resíduos sólidos urbanos, como plástico, papel, madeira e resíduos orgânicos – tais como bagaço de cana de açúcar, casca de coco, algodão, palma e fibras de cânhamo (KILANI et al, 2022) - podem ser tratados e transformados em combustíveis capazes de substituir o coque de petróleo, que é comumente utilizado como combustível para os fornos das fábricas de cimento e que apresentou aumento de 98% em seu preço em 2021 (ABCP, 2022).

Logo, a utilização de combustíveis derivados de resíduos pode ser uma alternativa viável e sustentável para a indústria cimenteira, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a gestão adequada de resíduos sólidos, sem perda de eficiência no processo e impactos negativos na qualidade do produto final (SHEHATA, 2022).

Para que o resultado da utilização desses resíduos seja benéfico, deve-se atentar à variação na composição química desses materiais, na presença de contaminantes, bem como a disponibilidade desses recursos e a aceitação do mercado para com esses produtos finais (JOSEPH *et al.*, 2018). Outra fonte de combustível alternativa é o lodo de esgoto, que possibilita a redução de custos e a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a gestão sustentável de resíduos e, conseqüentemente, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, essa alternativa ainda deve ser avaliada, visto que o lodo de esgoto possui metais pesados em sua composição, podendo prejudicar a qualidade do ar e do solo (VOICU et al., 2022).

Em relação ao clínquer, o principal componente do cimento - e principal responsável pela emissão de CO₂, pode-se ter como alternativa sustentável a substituição parcial deste por outros materiais que possuem propriedades aglomerantes, como cinzas volantes (resíduos da fumaça das fábricas, captada em filtros eletrostáticos), sílica ativa, metacaulim, escória granulada de alto forno e resíduos de mineração - definidos como Materiais Cimentícios Suplementares (GUPTA e CHAUDHARY, 2022). Muitos materiais cimentícios suplementares são subprodutos industriais da própria indústria cimenteira, de forma que as indústrias podem se fazer valer de seus próprios resíduos, sem depender de terceiros.

Uma alternativa de substituição parcial ou por inteiro do clínquer é a polpa de papel residual de indústrias ligadas à celulose, direcionando esses resíduos a uma nova utilidade, prolongando seu tempo de vida útil. É comprovado que a adição de polpa de papel pode melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do cimento, além de reduzir a porosidade do material, melhorando sua impermeabilidade e resistência a agentes agressivos. Contudo, testes laboratoriais e de campo são imprescindíveis para atestar a qualidade e conformidade do produto final (VILARINHO et al., 2022).

Essas alternativas ao clínquer permitem uma redução no consumo de energia e, conseqüentemente, na emissão de CO₂ envolvido no processo. Além disso, a indústria diversifica as fontes de matérias-primas, reduzindo a dependências de recursos naturais limitados, como o calcário (GUPTA e CHAUDHARY, 2022). Todavia, esses materiais podem impactar as propriedades do cimento produzido, no que tange à resistência e à durabilidade, devendo ser utilizados com cautela e apenas prosseguirem para distribuição após a realização de testes de laboratório e ensaios em campo (ZAJAC, 2022). Outro ponto a se observar são as regulamentações e quadros legais de cada país para a produção utilizando os materiais cimentícios suplementares, devendo as indústrias se adequarem aos padrões exigidos (GUPTA e CHAUDHARY, 2022).

Como alternativa ao calcário e outras matérias-primas na produção de cimento, os agregados reciclados advindos de resíduos de concreto podem ser utilizados, trazendo uma redução de até 52% da emissão de CO₂ ao produzir o clínquer, uma vez que esses agregados apresentam uma reatividade maior do que o calcário e podem contribuir para a formação de fases desejáveis do clínquer. Mas, essa ainda é uma prática emergente e que são necessários mais estudos para avaliar a viabilidade técnica e econômica dessa prática em larga escala, apesar de que qualquer quantidade de agregado reciclado é capaz de economizar energia nos fornos (ZACCARDI et al, 2022).

Logo, a valorização dos resíduos como no caso da indústria açucareira contribuem para a redução do desperdício e a utilização mais eficiente dos recursos, pois, com a recuperação e reutilização desses resíduos, é possível fechar o ciclo de produção, minimizando o impacto ambiental e promovendo a sustentabilidade, melhorando as propriedades do produto final (GOPINATH et al., 2018).

Miller et al. (2022) sugerem que haja melhorias na eficiência energética, principalmente nos fornos utilizados, com o intuito de maximizar a transferência de calor e reduzir os custos energéticos que essas perdas ocasionam. Além dos fornos, a instalação de sistemas de recuperação de calor nos processos de produção de cimento permite aproveitar o calor residual gerado durante a produção e utilizá-lo para aquecer água ou gerar eletricidade, reduzindo a necessidade de energia adicional.

Por fim, a otimização dos moinhos de clínquer também beneficia a economia energética no processo produtivo, podendo ser alcançada por meio de moinhos de rolos verticais ou moinhos de bolas de alta pressão, que minimizam as perdas no processo. Sendo assim, é notável a preocupação técnica intrínseca a esse assunto, onde os artigos abordam terminologias técnicas acerca de dureza, protocolos de produção, performance de produtos e afins. Além disso, há uma preocupação legal e política com o assunto.

Quadro 3 - Relações entre Economia Circular e o setor cimenteiro

Possibilidades de interface da Economia Circular no setor cimenteiro	Meio utilizado para realização dessa interface	Interface com a Economia Circular	Autores
--	--	-----------------------------------	---------

Utilização de resíduos como combustíveis fósseis	Resíduos orgânicos (bagaço, casca de coco, algodão, palma e fibras de cânhamo)	Maximização de vida útil de materiais; Mudança para energia e materiais renováveis	KILANI et al., 2022.
	Resíduos sólidos urbanos (papel, plástico, madeira e têxteis)	Maximização de vida útil de materiais	SHEHATA, 2022; JOSEPH et al., 2018.
	Lodo de esgoto		VOICU, 2022.
Substituição parcial do clínquer	Materiais cimentícios suplementares (Cinzas volantes, sílica ativa, metacaulium, escória granulada de alto forno e resíduos de mineração) residuais da própria indústria cimenteira	Minimização de perdas sistêmicas; Otimização de rendimento de recursos; Remanufatura de componentes	GUPTA e CHAUDHAR Y, 2022. ZAJAC et al., 2022.
	Polpa de papel residual	Recuperação, retenção e restauração da saúde dos ecossistemas	VILARINHO et al., 2022.
Substituição do calcário	Agregados advindos de resíduos de concreto	Minimização de perdas sistêmicas; Otimização de rendimento de recursos	ZACCARDI et al., 2022.
Adição de resíduos na produção	Palha de cana de açúcar	Mudança para energia e materiais renováveis	GOPINATH et al., 2018.
Melhorias na eficiência energética	Maximizar a transferência de calor nos fornos	Aumentar o desempenho/eficiência da produção; Remover resíduos na produção e na cadeia de suprimentos	MILLER et al., 2022.
	Instalação de sistemas de recuperação de calor		

Fonte: autores.

4.3 Processo produtivo de uma indústria cimenteira do DF

O principal produto da Empresa X é o Cimento Portland, material obtido pela pulverização do clínquer, material produzido por meio da calcinação de materiais calcários (calcário propriamente dito, conchas de origem marinha, entre outros), materiais argilosos (argila propriamente dita, xistos, ardósia e escórias de alto forno) e outros materiais corretivos (BAUER, 2019).

A presença dessas matérias-primas de forma abundante e próxima à unidade fabril é essencial, visto que o custo de transporte desta poderia inviabilizar a operação, como foi o caso da Usina Rodovalho, primeira fábrica de cimento do Brasil, que, entre outros fatores, teve a distância entre unidade fabril e matéria-prima como razão a sua derrocada (SANTOS, 2011). Desse modo, a Empresa X se localiza na Fercal, região administrativa do DF abundante em minérios naturais. De acordo com o entrevistado A, ainda existem empresas que compram de terceiros o clínquer (inclusive da Empresa X) e trabalham apenas com a moagem desse material, realizando a produção e a expedição final do cimento.

Por estar geograficamente privilegiada, a Empresa X trabalha desde a extração da matéria-prima até a expedição do cimento. A primeira etapa é a extração de rochas calcárias. As minas são caracterizadas quimicamente, onde por meio de análises laboratoriais são definidos quais locais podem ter os materiais explorados. De acordo com o entrevistado B, a

Empresa X “[...] trabalha com calcário e com argila. Os demais componentes a gente compra de fora, que seriam minério de ferro e gesso”. As pedras de argila e calcário são extraídas através de detonação, havendo logo após o carregamento e transporte por meio de correias dos materiais colhidos até as próximas etapas do processo, de acordo com o entrevistado A.

Extraída a matéria-prima, essa passa pelo processo de britagem, que busca quebrar as rochas em pedaços menores. O produto dessa diminuição (calcário + argila) passa pela pré-homogeneização, para que sejam realizadas análises químicas desses agregados extraídos, com o intuito de identificar presenças indesejadas para a produção de cimento. De acordo com o entrevistado B: “Como a gente trabalha quimicamente com o cimento, talvez a gente pegue uma lavra de rocha que tenha em sua composição o magnésio, por exemplo. O magnésio é ruim para o concreto, que é futuramente o produto que vai ser utilizado.”

Realizado o equilíbrio químico para que se tenha um material de boa qualidade, é feita a homogeneização. Esse agregado homogeneizado sai por uma pilha, é analisado por equipamentos específicos que detectam a sua composição química e, conforme esse equipamento vai quantificando quimicamente esse material, pessoas no comando central de operação fazem a dosagem correta para a produção de cimento.

Esse produto é moído juntamente aos minérios de ferro no moinho de bolas, resultando numa farinha bastante fina, chamado de “cimento cru”. Essa farinha é aquecida em um forno a 1.450°C, iniciando a transformação química dos componentes ali presentes. Resfriada essa lava, resulta-se o clínquer, que é a base do cimento, num formato esférico. Essas esferas são moídas novamente, tornando-se uma farinha.

Feito o clínquer, dá-se início ao processo de produção de cimento de fato, com o clínquer, gesso e outras adições, a depender do tipo de cimento a ser fabricado. De acordo com o entrevistado A, “São produzidos o cimento CPV, o CPIV e o CII-Z-32. O CPIV e o CII-Z-32 possuem adição de pozolana, uma argila calcinada que a gente traz de fora in natura, faz as análises químicas dela e depois calcina. Calcinar é passar pelo processo de forno para ela ser adicionada nesse processo de moagem”.

A utilização e a dosagem dessa pozolana irão diferenciar o produto final em termos de resistência e características físicas e mecânicas do concreto. Já o Cimento CPV pode ser constituído apenas de Clínquer e gesso ou possuir adição de filler (material carbonático), a depender do contexto e da disponibilidade. Destaca o entrevistado B: “[...] o filler, um material carbonático, é um subproduto do processo de britagem. Na britagem é gerado um resíduo, que é um pó muito fino, que volta para o processo como adição na produção de cimento.”

A recuperação do filler enquanto resíduo e a sua utilização no processo produtivo do cimento são exemplos de práticas de EC na indústria cimenteira, onde essa busca remover ou recuperar resíduos em determinados processos, em que os recuperados serão reintegrados para uma nova produção.

Feita a mistura dos materiais conforme o produto desejado, o cimento já está pronto para ser expedido, seja em saco (no padrão do mercado), seja a granel (em caminhões potes ou “big bag”, que são sacos grandes com capacidade de 1 tonelada).

4.4 Práticas sustentáveis de uma indústria cimenteira do DF

Dentre as práticas sustentáveis que vêm sendo adotadas pela Empresa X, percebe-se que a empresa investiu fortemente em coprocessamento. Esse investimento segue uma tendência internacional das indústrias cimenteiras em buscar fontes renováveis e resíduos como insumos na produção. De acordo com o entrevistado B:

Atualmente, a *Empresa X* realiza o coprocessamento, que foi viabilizado por meio de um investimento de valor elevado, mas de alto valor agregado. [...] o combustível principal dos fornos é o coque, que é de origem fóssil e derivado de petróleo. Este sistema permite que a empresa use o coque como combustível principal, mais uma

porcentagem de combustível alternativo que é o resíduo de biomassa (casca de arroz, madeira, caroço de açaí (renováveis).

Conforme dito pelo entrevistado A, a expectativa é substituir até 40% do seu combustível por essas fontes alternativas. Esses materiais atualmente são adquiridos de outras indústrias, onde em vez desses materiais serem despejados em aterros, dá-se outra finalidade com o intuito de maximizar seu tempo de vida útil, além de não prejudicar os solos em que eles seriam depositados, trazendo uma pegada ecológica e benefícios energéticos para a empresa, corroborando com a EC, onde a empresa busca fontes renováveis em detrimento aos combustíveis fósseis não renováveis. Já existem projetos para que essa captação de resíduos seja realizada pela própria empresa, onde essa disponibilizaria centros de coleta. De todo modo, por mais que haja a necessidade de realizar a compra desses materiais, ainda é mais vantajoso economicamente a utilização desses resíduos em relação ao coque de petróleo.

Em relação ao produto final, não há prejuízo em termos de qualidade. Dessa forma, são feitas classificações e análises de resíduos propícios a serem utilizados como combustíveis alternativos, para que esses não interfiram no produto final, conforme relata o entrevistado B:

[...] os estudos de limites de dosagens estabelecem o que deve ser feito (não revelados). A parte química desse material na combustão interfere no produto, na química do produto. Então, são feitas essas classificações de resíduos e são feitas essas análises também, para que essa porcentagem não influencie na qualidade final do produto, mas sirva como combustível alternativo. Trata-se de um ponto positivo, gerando uma economia de energia e reduzindo o impacto ao meio ambiente.

Com isso, a utilização de combustíveis alternativos é vista como um benefício ao meio ambiente, assim como traz economia de energia à Empresa X. Durante o ano de 2021, o preço do coque de petróleo subiu de US \$50,00 em 2019 para US \$180,00 em 2022. Além disso, o frete saltou de US\$18,00 para US\$35,00 (ABCP, 2022). Além disso, a utilização de materiais alternativos e a redução de combustíveis no processo produtivo são estratégias eficientes para a redução da emissão de CO₂ pelas fábricas de cimento (BENHELAL, 2013).

Ainda sobre a redução de emissão de CO₂, o entrevistado B conclui que “a indústria de cimento possui uma pressão muito grande sobre a emissão do CO₂. Essa é uma pegada mundial porque o concreto é o segundo material mais consumido do mundo”. De acordo com o entrevistado B:

[...] essa emissão está relacionada ao percentual de clínquer presente no cimento. Quanto maior a pureza, maior a presença de clínquer na formulação de cimento, mais emissão de CO₂ ele vai gerar. Como se reduz emissões? Realizando estudos de adições. Exemplo: o CPIV. O CPIV é um cimento considerado ecológico, com uma pegada de carbono menor. A Empresa X trabalha com estudos de adições minerais para reduzir a emissão de CO₂. Atualmente, utiliza a pozolana e em alguns casos utiliza a escória, que são os materiais mais utilizados pelas empresas como aditivos.

Para cada tonelada de clínquer produzido, emite-se aproximadamente 900kg de CO₂ na atmosfera (MOREIRA & REGO, 2020). Portanto, dada a pressão interna por redução da emissão dos níveis de CO₂, há o esforço dos engenheiros químicos e do departamento de produção para que se encontre soluções viáveis de redução de emissões por meio da adição de minérios, pensando sempre na qualidade do produto final.

Por fim, há atividades específicas voltadas para a preservação dos recursos hídricos utilizados na Empresa X. Conforme relatado pelo entrevistado A:

A questão da utilização eficiente da água se dá pelo uso em circuito fechado dos sistemas de resfriadores tanto dos fornos quanto das áreas de moagem. Ela resfria o equipamento e vai passar por um equipamento para fazer a retenção dessa temperatura, que se chama torre alpina. Ela é armazenada em uma caixa e volta novamente para o ciclo fechado, onde você vai ter uma perda muito pequena, apenas por meio da evaporação.

Essa estratégia de ciclo fechado conversa com a Economia Circular uma vez que recupera, retém e restaura esse recurso finito, utilizando-o com o mínimo de perda, prolongando sua vida útil. Além disso, a perda é mínima, ou seja, os processos de resfriamento são realizados

com baixa presença de resíduos advindos dele. Ademais, de acordo com dados públicos, a Empresa X também reutiliza a água utilizada no processo produtivo na lavagem de seus veículos, lavagem de agregados produzidos e está constantemente analisando a qualidade desse recurso utilizado em suas operações.

4.5 Oportunidades e barreiras à implementação da Economia Circular

No que diz a respeito às oportunidades e barreiras à implementação da Economia Circular, os entrevistados destacaram a oportunidade de possuir uma boa imagem pelo mercado consumidor, a redução de energia e a adesão a uma tendência global, apesar de exigir custos elevados e haver morosidade na implementação por conta da burocracia envolvida. A Empresa X possui uma pressão interna relacionada à diminuição da emissão de CO₂, possuindo objetivos relacionados a sua produção e portfólio de produtos estabelecidos pelo grupo empresarial a qual pertence. Desse modo, o desafio em reduzir a emissão de CO₂ é visto como possibilidade de melhoria contínua por meio da Economia Circular.

Além disso, há a demanda do mercado para produtos voltados à sustentabilidade e com pegada ecológica, sem perder a qualidade técnica e conformidade esperada do produto. Essa demanda converge com a estratégia de “Regenerar” e “Otimizar” da estrutura ReSOLVE, criada pela Ellen MacArthur Foundation, onde a empresa traz produtos que utilizam em sua composição energia e materiais renováveis, sem perder desempenho do produto. De acordo com o entrevistado B:

O cliente quer um cimento ecológico, mas o que ele mais quer é a resistência. [...] a pegada ecológica está na imagem da empresa e gera uma pressão interna, para reduzir o impacto externo. [...] o cliente também analisa por que ele também passa por certificações, as construtoras passam por certificações e se elas tiverem no seu portfólio de fornecedores empresas que tem essa vertente de reaproveitamento, também se torna um ponto positivo para elas. A sociedade hoje está se baseando muito na diminuição do impacto ambiental, então tem um benefício muito grande na imagem da empresa.

Visando estabelecer-se no cenário de empresas sustentáveis, já se pensa internamente em captar os resíduos urbanos de forma ativa, sem depender de intermediários para que os resíduos cheguem até a fábrica. Para isso, faria valer como oportunidade a sua localização, na Fercal, para que se estabelecesse parcerias com empresas próximas que forneceriam esses resíduos delas próprias, bem como se prepararia para dar tratativas devidas a cada tipo de resíduo, com equipamentos e pessoal específicos para essa destinação. Desse modo, a Empresa X não ficaria à mercê da disponibilidade das empresas especializadas em tratar o material residual, podendo ter maior previsibilidade na quantidade de material que seria utilizado como fonte de combustível. Além disso, deixa de estar dependente de uma fonte de combustível fóssil não renovável e suas flutuações de preço que variam de acordo com o câmbio e com sua disponibilidade. Essa ação conversaria com as estratégias “Regenerar”, “Compartilhar” e “Ciclar” da estrutura ReSOLVE, onde essa utilizaria como fonte de energia os resíduos recolhidos juntamente a esses parceiros, dando uma nova finalidade a materiais que provavelmente seriam descartados sem utilidade alguma.

Contudo, para que essas ações sejam implementadas, há a necessidade de que sejam feitos altos investimentos, como foi feito para o coprocessamento. De acordo com o entrevistado B:

[...] para ter o coprocessamento na fábrica, foram investidos milhões reais para obter o produto no nível de ser classificado. A adaptação às questões ecológicas da *Empresa X* para reduzir emissões de CO₂ exigiu investimento em tecnologias de produto e processo (coprocessamento), a partir de investimentos em estudos e pesquisas sobre adições minerais para compreender qual seria o impacto de resistência que se teria no cimento.

Outra barreira é a regulação ambiental para as liberações de realizações de ações internas na empresa. De acordo com o entrevistado A:

Acredito que a maior barreira seja a burocracia ambiental mesmo. Digamos que atualmente você tem uma liberação para fazer a substituição de 30% a 40% do material. Se você vai solicitar um aumento, tem que passar por uma gama de estudos, entrar numa parte burocrática num órgão que vai levar de 6 meses a 1 ano a depender da gravidade do assunto ou do tipo de resíduo que vai entrar. Essa morosidade, até por não ter uma equipe técnica estruturada no órgão para analisar, termina prejudicando um pouco a questão do avanço dessa otimização das empresas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse estudo foi desenvolvido em decorrência do aumento das emissões de GEE, tendo consequência a crise climática global, que vem demonstrando sinais do estresse do Planeta Terra. Como foi demonstrado ao longo do artigo, a indústria cimenteira é responsável por emissões de CO₂ da ordem de 5% a 7%, globalmente.

Logo, enxerga-se na Economia Circular uma saída viável e promissora para que essas emissões sejam reduzidas ao máximo, de modo que haja um caminho em que convergem à eficiência industrial e à preservação do meio ambiente e seus recursos. Nessa linha, este estudo fixou como objetivo analisar as práticas da indústria do cimento a partir dos princípios da EC.

O estudo apresentou um histórico, com aspectos, impactos e as ações da indústria de cimento, que demonstram de forma clara que existe um grande potencial para reduzir significativamente as emissões de CO₂ no setor. A revisão de literatura identificou artigos que relacionavam a indústria cimenteira, o cimento e o concreto com práticas de EC, e que trouxessem alternativas planejadas, aplicadas e analisadas para que se compreendesse em que estado essa indústria está em relação ao tema da EC.

Após compreender o atual momento da EC na indústria cimenteira, seja na produção de cimento ou no concreto, buscou-se investigar no processo produtivo, as práticas sustentáveis, bem como as oportunidades e barreiras para implementação de práticas relacionadas à EC numa indústria de cimento no DF.

A análise fluiu à luz do problema de pesquisa proposto e do objetivo estabelecido para esse trabalho, e pode-se afirmar que foram alcançados por meio de revisão sistemática da literatura realizada sobre o tema Economia Circular na Indústrias de Cimento, bem como por meio do estudo de caso realizado no DF, com entrevistas semiestruturadas realizadas com especialistas da Empresa X.

O processo produtivo de cimento é, como dito por um especialista entrevistado, “uma receita de bolo”, na qual há possibilidades de se aplicar melhorias que contribuam para reduzir a pegada ecológica sem prejudicar o produto final. Há o interesse para que ocorram melhorias contínuas relacionadas a redução de emissão de CO₂ pelas fábricas, que reverbera como imagem positiva para a empresa perante o mercado, trazendo maior aceitação pelo público consumidor e, ocasionalmente, potencializando as receitas.

No campo de custos, alternativas sustentáveis também são bem-vistas dado que possuem o potencial de reduzirem os gastos da empresa com fontes de energia e a coloca num espaço que não dependa de fontes não renováveis e suas flutuações de preços. Todavia, preparar-se para que essas oportunidades sejam aproveitadas ao máximo exige altos investimentos financeiros e de tempo para as fábricas, visto que exigem maquinário, pesquisas, pessoas e estratégias bastante específicas, bem como a adaptação às questões regulatórias para que sejam realizadas em conformidade com as normas vigentes de cada país.

Entende-se como limitação deste estudo, a utilização de apenas uma fábrica como estudo de caso, uma vez que as práticas e insumos podem variar conforme a localidade de cada indústria, visto que no Brasil existem 91 fábricas distribuídas em 80 municípios de 23 UF, sendo possível que haja diferenças entre os resíduos encontrados e utilizados como fontes de energia

para essa indústria. Outra limitação foi o não acesso à documentação da empresa, o que poderia possibilitar o aprofundamento em cada prática e a sua comprovação.

Para futuros trabalhos sugere-se que se busque investigar como a EC impacta os aspectos financeiros e mercadológicos do negócio na indústria cimenteira.

REFERÊNCIAS

- ABCP. **Indústria brasileira faz a sua parte na redução de emissões**. 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/industria-brasileira-faz-a-sua-parte-na-reducao-de-emissoes/>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- ABCP. **Inventário de gases de efeito estufa é ferramenta importante para indústria reduzir emissões**. 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/inventario-de-gases-de-efeito-estufa-e-ferramenta-importante-para-industria-reduzir-emissoes/>. Acesso em: 23 mai. 2023.
- ABCP. **O encadeamento da indústria do cimento no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://abcp.org.br/o-encadeamento-da-industria-do-cimento-no-brasil-2/>. Acesso em: 23 mai. 2023.
- BAUER, L.A. **Materiais de Construção**. Vol. 1, 6. ed. Barueri. LTC, 2019.
- BENHELAL, E. *et al.* **Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry**. Journal of cleaner production, v. 51, p. 142-161, 2013.
- BONCIU, F. I. **The European Economy: From a Linear to a Circular Economy**. Romanian Journal of European Affairs, Vol. 14, No. 4, December 2014.
- BRASIL. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- CHEN, C. *et al.* (2010). **Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation**. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652609004089>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- CADE. **Mercado de cimento no Brasil**. 2019. Disponível em: https://cdn.cade.gov.br/Portal/centrais-de-conteudo/publicacoes/estudos-economicos/cadernos-do-cade/DOI/Caderno-do-Cade_Mercado-de-Cimento_DOI_10.52896_dee.cc1.019.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Economia circular em Cidades: pacote de recursos**. 2019. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/pt/a-economia-circular-nas-cidades>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. 2015. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf. Acesso em: 24 mar. 2023.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: uma exploratória inicial**. 2017. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf. Acesso em: 20 mar. 2023.
- FREITAS, S.; NOBREGA, C. **Os benefícios do coprocessamento de pneus inservíveis para a indústria cimenteira**. jul-set 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/LjflGqgWPVWShRDFBsrnmxF/abstract/?lang=pt>. Acesso em 30 mar 2023

GALVÃO, T.; PEREIRA, M., **Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração.** mar. 2014. Disponível em: http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742014000100018. Acesso em: 28 mar. 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK (2022). Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/resources/footprint-calculator/>. Acesso em: 27 dez. 2022.

GOPINATH A. *et al.* (2018). **A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries.** Journal of Cleaner Production, Vol. 203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252>.

GUPTA, S. **State of the art review on Supplementary Cementitious Materials in India – I: An overview of legal perspective, governing organizations, and development patterns,** Journal of Cleaner Production, Volume 261. jul. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620312506>. Acesso em: 05 abr. 2023.

JOSEPH, P. *et al.* **The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View,** Materials, Volume 11. jan. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29337887/>. Acesso em; 25 mar. 2023.

KARSTENSEN, K. H. **Formation and Release of POPs in the Cement Industry.** jan. 2006. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Formation-and-Release-of-POPs-in-the-Cement-Industry-Second-Edition>. Acesso em: 26 mar. 2023.

KILANI, A. *et al.* **Evaluating the effects of agricultural wastes on concrete and composite mechanical properties: a review.** Res. Eng. Struct. Mater. dez. 2021. Disponível em: <http://jresm.org/archive/resm2021.339st0912.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.

MARTIRENA, J.F.; SCRIVENER K.L. **Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba.** Advances in cement research. jan. 2015. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-9939-3_40. Acesso em: 25 mar. 2023.

MILLER, S. *et al.* **Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies.** 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332221005339>. Acesso em: 27 mar. 2023.

MOREIRA, C.; REGO, J. H. S. **Efeito do teor de gipsita na resistência à compressão do cimento LC.** 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Cxx6N7V5bs9JPRXM5ZGQyDS/?format=pdf>. Acesso em: 23 mar. 2023.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PLANING, P. **Business Model Innovation in a Circular Economy Reasons for Non-Acceptance of Circular Business Models.** abr. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273630392_Business_Model_Innovation_in_a_Circular_Economy_Reasons_for_Non-Acceptance_of_Circular_Business_Models. Acesso em: 14 abr. 2023.

SANTOS, L. B. **A Indústria de cimento no Brasil: Origens, consolidação e internacionalização.** jun. 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/view/11415>. Acesso em: 14 abr. 2023.

SHEHATA, N. *et al.* **Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals.** Process Safety and Environmental Protection. Volume 163. jul. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582022004554>. Acesso em: 07 abr. 2023.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SNIC. **Dados do setor**. 2023. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 31 jan. 2023.

STAHEL, W. R. **The circular economy**. Mar. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/298909366_Circular_economy. Acesso em: 20 mar. 2023.

U.S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2022**. U.S.: Geological Survey, 2022.

VILARINHO, I. et al. **Review of recycling alternatives for paper pulp wastes**. out. 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2022.1006861/full>. Acesso em: 23 mar. 2023.

VOICU, G. et al. **Recovery of Sewage Sludge in the Cement Industry**. Energies. Volume 15. abr. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/359751862_Recovery_of_Sewage_Sludge_in_the_Cement_Industry. Acesso em: 22 mar. 2023.

WBCSD. **Cement Technology Roadmap**. 2009. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/897b7ad9-200a-4314-b870-394dc8e6861a/CementTechnologyRoadmap-CarbonEmissionsReductionsupto2050.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023.

YIN, R. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZACCARDI, Y. et al. **Complete re-utilization of waste concretes–Valorisation pathways and research needs**. Resources, Conservation and Recycling. Volume 177. fev. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921005644>. Acesso em: 21 mar. 2023.

ZAJAC, C., et al. **CO₂ Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry**. Energies. Volume 15. maio 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/10/3597>. Acesso em: 23 mar. 2023.