

MARCIA DELANE SILVA

**Avaliação do potencial de descarbonização da construção civil
com Hidrogênio Verde: Uma análise técnica aplicada ao Maranhão**

SÃO LUÍS, MA

2025

MARCIA DELANE SILVA

**Avaliação do potencial de descarbonização da construção civil
com Hidrogênio Verde: Uma análise técnica aplicada ao Maranhão**

Dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em
CIÊNCIAS & TECNOLOGIA
AMBIENTAL da Universidade Federal
do Maranhão como requisito à
obtenção do título de MESTRE.

Orientador: Prof. Dr. José Renato de Oliveira Lima

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Aurélio Araújo Santos

Linha de pesquisa: Biotecnologias e Tecnologias aplicadas ao Meio Ambiente

SÃO LUÍS, MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva, Marcia Delane.

Avaliação do potencial de descarbonização da construção civil com Hidrogênio Verde: : uma análise técnica aplicada ao Maranhão / Marcia Delane Silva. - 2025.

75 p.

Corientador(a) 1: Prof. Dr. Marcos Aurélio Araújo Santos.

Orientador(a): Prof. Dr. José Renato de Oliveira Lima.
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Hidrogênio Verde. 2. Descarbonização. 3. Construção Civil. 4. Emissões de Co₂. 5. Sustentabilidade. I. Lima, Prof. Dr. José Renato de Oliveira. II. Santos, Prof. Dr. Marcos Aurélio Araújo.

MARCIA DELANE SILVA

**Avaliação do potencial de descarbonização da construção civil
com Hidrogênio Verde: Uma análise técnica aplicada ao Maranhão**

Dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em
CIÊNCIAS & TECNOLOGIA
AMBIENTAL da Universidade Federal
do Maranhão como requisito à
obtenção do título de MESTRE.

Aprovada em / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Renato de Oliveira Lima
Universidade Federal do Maranhão

Prof^a. Dr. Cláudio Luís de Araújo Neto
Universidade Federal do Maranhão

Prof^a. Dr. Gilvan Moreira da Paz
Universidade Federal do Piauí

SÃO LUÍS,
MA 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, força e resiliência para chegar até aqui.

À minha família, pelo amor incondicional, paciência e incentivo constante em todos os momentos.

Aos meus filhos, que são minha maior motivação e fonte de alegria, agradeço por me ensinarem, todos os dias, o verdadeiro significado de perseverança e esperança.

Ao meu orientador, pela dedicação, apoio e orientação indispensáveis ao longo deste percurso. Suas palavras de incentivo e seu conhecimento foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos vocês, minha eterna gratidão por serem parte essencial desta jornada.

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o potencial de aplicação do hidrogênio verde (H V) como estratégia de descarbonização nos setores industriais da construção civil, com foco na indústria do cimento no Estado do Maranhão. A investigação parte do reconhecimento de que a construção civil é uma das principais emissoras de gases de efeito estufa (GEE), e que tecnologias de baixa emissão, como o H V, podem desempenhar papel central na transição para uma economia de baixo carbono. Para tanto, a pesquisa foi conduzida com base em uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, estruturada em duas etapas principais: revisão bibliográfica sobre o uso do H V em processos industriais e estudo de caso aplicado a uma fábrica de cimento situada em São Luís – MA, que opera com moagem de clínquer importado. Os dados foram obtidos por meio de visitas técnicas, entrevistas com a equipe da planta e análise de documentos operacionais, possibilitando a quantificação das emissões de CO₂ e a simulação de cenários de mitigação com o uso do H V. Os resultados indicam que, mesmo em plantas que não realizam a calcinação localmente, como é o caso estudado, o uso do H V pode reduzir substancialmente as emissões, especialmente a substituição da eletricidade de origem fóssil e do processo da calcinação pode reduzir as emissões de 975 kg para 590 kg de CO₂ por tonelada de cimento. Com a produção local de clínquer e o uso de energia renovável, essa redução pode atingir 91%. Esses dados consolidam o Maranhão como território estratégico para novos arranjos produtivos sustentáveis, com infraestrutura portuária consolidada, disponibilidade de fontes renováveis e sinergia com cadeias produtivas de baixo carbono. Mais do que um estudo pontual, o estudo de caso desenvolvido configura-se como protótipo replicável, orientado pelos princípios de sustentabilidade ambiental, social e de governança (ESG). A análise projeta margens reais de competitividade para o H V no Estado, com estimativas de custo entre US\$ 1,5 e 2,5/kg até 2030. A análise conclui que o Maranhão apresenta condições estratégicas, como: infraestrutura portuária, potencial renovável e posição logística, para tornar-se um polo de produção e aplicação do H V, contribuindo para a conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e para a valorização econômica via créditos de carbono.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; Descarbonização; Construção civil; Emissões de CO₂; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This research aims to assess the potential application of green hydrogen (H₂) as a decarbonization strategy in the industrial segments of the construction sector, with a particular focus on the cement industry in the state of Maranhão, Brazil. The study is based on the recognition that the construction sector is among the largest emitters of greenhouse gases (GHG), and that low-emission technologies such as H₂ can play a central role in the transition to a low-carbon economy. The investigation was conducted through a qualitative, exploratory, and descriptive approach, structured in two main phases: a literature review on the use of H₂ in industrial processes and a case study applied to a cement plant located in São Luís – MA, which operates exclusively with the grinding of imported clinker. Data were collected through technical visits, interviews with the plant's engineering team, and analysis of operational documents, allowing for the quantification of CO₂ emissions and the simulation of mitigation scenarios using H₂. The results show that, even in plants that do not perform local calcination, such as the one studied, the use of H₂ can substantially reduce emissions, especially when replacing fossil sources in heat and electricity generation. The substitution of fossil-based electricity and calcination processes can reduce emissions from 975 kg to 590 kg of CO₂ per ton of cement. With local clinker production and the use of renewable energy, this reduction can reach up to 91%. These findings position Maranhão as a strategic territory for new sustainable industrial arrangements, supported by its port infrastructure, renewable energy potential, and integration with low-carbon production chains. More than a punctual assessment, the case study is presented as a replicable prototype aligned with ESG principles. The analysis projects real competitive margins for H₂ in the state, with cost estimates ranging from US\$ 1.5 to 2.5/kg by 2030. It concludes that Maranhão holds strategic conditions such: port infrastructure, renewable energy availability, and favorable logistics, to become a hub for H₂ production and application, contributing to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) and to economic valorization through carbon credits.

Keywords: Green hydrogen; Decarbonization; Construction sector; CO₂ emissions; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção de cimento: da extração clínquer	16
Figura 2 - Esquema do processo siderúrgico de produção de aço	18
Figura 3 - Hidrogênio por cor de acordo com a sua tecnologia de produção	21
Figura 4 - Comparação dos preços do hidrogênio via gás natural e fontes renováveis	22
Figura 5 - Produção de hidrogênio verde em função da implantação do eletrolisador, custo instalado e preço da eletricidade, constantes ao longo do período 2020-2050	23
Figura 6 – Comparação das emissões de CO entre o uso de H ₂ convencional e H ₂ V na produção de aço e cimento	26
Figura 7 – Materiais (aço e cimento) com suas emissões de CO ₂ nos processos convencionais, com uso do hidrogênio verde e suas reduções	33
Figura 8 – Fontes de emissões de CO ₂ no setor de construção civil	34
Figura 9 – Emissões de CO ₂ nos processos convencionais de produção de aço e cimento	35
Figura 10 – Emissões de CO ₂ nas diferentes etapas da produção de cimento	41
Figura 11 – Fontes de emissão de CO ₂ na moagem de cimento	44
Figura 12 – Esquema do processo de produção de cimento na unidade de moagem São Luís	51
Figura 13 - Fonte de emissão de CO ₂ na produção de cimento, por tonelada	52
Figura 14 – Fonte de emissão de CO ₂ na moagem de cimento na fábrica de São Luís	54
Figura 15 – Comparativo emissões atuais x emissões com H ₂ V com redução	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Materiais da construção civil (aço e cimento) com uso de hidrogênio	32
Quadro 2 – Composição química dos principais componentes	49
Quadro 3 – Análise química do cimento	51
Quadro 4 – Comparativo das emissões CO ₂ no processo atual da empresa emissão estimada com uso H ₂ V nas diferentes fontes	58
Quadro 5 – Impacto projetado com clínquer local e hidrogênio verde	60
Quadro 6 - Comparativo das emissões de CO por tonelada de cimento: cenário atual x cenário com hidrogênio verde	62

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Alumina
AQUA-HQE	Certificado Internacional da Construção de Alta Qualidade Ambiental
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CaO	Cal
CBCi	Congresso Brasileiro do cimento
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP 26	Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CP	Cimento Portland
CSI	Cement Sustainability Initiative
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
ESG	Environmental, Social and Governance
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ V	Hidrogênio Verde
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MCTIC	Ministério de Ciências Tecnológicas e Inovações
MgO	Óxido de Magnésio
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
SiO ₂	Sílica
SNIC	Sindicato da Indústria de Cimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 O setor da construção civil e suas emissões	13
2.2 Produção de cimento e aço: fontes de emissão	15
2.3 O hidrogênio verde como alternativa sustentável	19
2.4 Aplicações do hidrogênio verde na indústria	21
2.5 Desafios e perspectivas para o Brasil e o Maranhão	23
3 JUSTIFICATIVA	24
4 OBJETIVOS	27
4.1 Objetivo geral	27
4.2 Objetivos específicos	27
5 METODOLOGIA	28
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6.1 Emissões e reduções possíveis nas indústrias do cimento e aço	32
6.2 Análise das emissões de carbono nos processos convencionais de produção de cimento e aço	34
6.2.1 Processo de produção de aço	36
6.2.2 Emissões de CO ₂ e tecnologias de descarbonização na produção de aço	38
6.2.3 Tecnologias de descarbonização para o setor do aço	39
6.2.4 Processo de produção de cimento portland	40
6.2.5 Emissões de CO ₂ e tecnologias de descarbonização na produção de cimento	41

6.2.6 Fontes de emissão de CO ₂ na moagem de cimento	43
6.3 Tecnologias de descarbonização no setor cimenteiro - Potencial de redução de emissões com substituição pelo hidrogênio verde (H ₂ V)	45
6.4 Inovações e pesquisas na descarbonização da produção de cimento	47
6.5 Estudo de caso	48
6.5.1 Matéria-prima utilizada	49
6.5.2 Processo produtivo e qualidade do cimento da planta	50
6.5.3 Quantitativo de emissões de CO ₂ no processo de moagem	52
6.5.4 Avaliação da substituição do hidrogênio convencional ou inserção do hidrogênio verde na redução das emissões de CO ₂	56
6.6 Considerações sobre os desafios e limitações para o uso de H ₂ V nas indústrias de aço e cimento	61
7 CONCLUSÃO	64
8 CONTRIBUIÇÕES ATRELADAS À DISSERTAÇÃO	65
8.1 Importância Social	65
8.2 Importância Econômica	65
8.3 Importância Ambiental	66
REFERÊNCIAS	67
ANEXO I – Artigo produto de pesquisa da dissertação	75

1. INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável, amplamente difundido desde a década de 1980, refere-se à capacidade de suprir as necessidades presentes sem comprometer as futuras gerações (Brown, 1981). Com o agravamento das mudanças climáticas e a crescente emissão de gases de efeito estufa (GEE), diversos setores industriais têm sido pressionados a adotar práticas mais sustentáveis. Entre esses setores, destaca-se a construção civil, responsável por parcela significativa das emissões globais de carbono (IPCC, 2022).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris — que visa limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C — exige que as emissões globais atinjam o pico ainda nesta década e sejam reduzidas a zero até 2050. Para isso, é imprescindível a descarbonização de setores com alta intensidade energética, como a indústria de cimento, siderurgia e os sistemas de transporte.

O hidrogênio verde (H V), produzido por eletrólise da água com uso exclusivo de fontes renováveis, tem sido apontado como uma alternativa promissora nesse contexto. Diferentemente das rotas convencionais de produção — que utilizam gás natural ou carvão e resultam na emissão de CO — o H V é obtido sem gerar emissões diretas de carbono, sendo considerado uma tecnologia-chave para a neutralidade climática (IEA, 2016; IPEA, 2022).

Seu potencial de aplicação abrange desde a produção de calor industrial até a redução de minério de ferro na fabricação de aço e o fornecimento de energia para veículos pesados. Essa versatilidade é particularmente relevante para a construção civil, que integra uma cadeia produtiva extensa, com alto consumo de energia e materiais, e contribui com aproximadamente 37% das emissões globais de GEE (IEA, 2020).

O Brasil apresenta condições estratégicas para a expansão da produção de H V, em virtude da abundância de fontes renováveis e da infraestrutura energética existente. Projetos em desenvolvimento nos portos de Itaqui (MA), Pecém (CE), Suape (PE) e Açu (RJ) reforçam a viabilidade técnica e logística do país como futuro exportador de hidrogênio de baixo carbono (IPEA, 2022). Além disso, o marco regulatório vem sendo

consolidado por instrumentos como o Projeto de Lei nº 725/2022 — que inclui o hidrogênio na matriz energética nacional — e o Decreto nº 11.075/2022, que institui o mercado regulado de carbono no Brasil.

Apesar desse potencial, o uso do hidrogênio verde na construção civil brasileira ainda é incipiente. A produção de cimento e aço, principais insumos do setor, permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis e métodos convencionais de alto impacto ambiental. A fabricação de uma tonelada de clínquer, componente essencial do cimento, pode liberar até uma tonelada de CO₂ (dióxido de carbono) na atmosfera (Isaia & Gastaldini, 2004; Van Oss & Padovani, 2002). De forma semelhante, o processo siderúrgico com uso de alto-forno pode emitir cerca de 2.494 kg de CO₂ por tonelada de aço produzido (IEA, 2020).

Diante desses desafios, torna-se urgente investigar soluções tecnológicas que promovam a descarbonização da cadeia produtiva da construção civil, com foco em alternativas energeticamente limpas, como o hidrogênio verde. Este trabalho tem por objetivo principal avaliar o potencial de aplicação do H₂V como ferramenta de descarbonização na construção civil, por meio da análise de processos produtivos intensivos em carbono, com destaque para a produção de cimento no estado do Maranhão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O setor da construção civil e suas emissões

O setor da construção civil tem grande impacto ambiental global. Ele é responsável por cerca de 30% do consumo mundial de energia final (IEA, 2020) e quase 50% de toda a extração de recursos naturais (UNEP, 2020). Além disso, gera cerca de 40% dos resíduos de construção e demolição (RCD), o que o torna um dos maiores geradores de resíduos sólidos.

As fases de construção e operação dos edifícios contribuem com 37% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), majoritariamente devido ao uso de combustíveis fósseis para aquecimento e ao consumo de eletricidade oriunda de fontes

com alta intensidade de carbono, além da produção de materiais como aço e cimento (IEA, 2020; UNEP, 2020; XI *et al.*, 2016).

Esse panorama se torna ainda mais preocupante diante da urbanização contínua e do crescimento populacional, que pressionam por novas edificações e infraestrutura. A Divisão de População das Nações Unidas (2018) projeta um aumento populacional global significativo até 2050, acentuando a necessidade de estratégias eficazes de mitigação no setor. Dessa forma, descarbonizar a construção civil é condição essencial para o cumprimento das metas climáticas do Acordo de Paris (Global ABC *et al.*, 2020).

Frente a esse desafio, diferentes estratégias de mitigação vêm sendo discutidas. As abordagens do lado da demanda incluem o aumento da suficiência material, evitando consumo excessivo de insumos e promovendo bem-estar dentro dos limites planetários; e a eficiência energética operacional, com construções mais inteligentes e menos dependentes de energia (Saheb, 2021; CE Delft, 2020). Já as estratégias do lado da oferta envolvem a transição para energias renováveis e o uso de materiais de baixo carbono, como produtos à base biológica ou reciclados (EASAC, 2021).

No Brasil, a construção civil responde por 40 a 50% da utilização de recursos naturais, gera cerca de 25% dos resíduos sólidos urbanos, consome 25% da água potável e ocupa cerca de 12% da terra urbana (UNEP, 2012). Esses dados reforçam a urgência de se repensar os processos construtivos, considerando seu peso ambiental. Segundo a FGV (2011), para promover ações eficazes de mitigação, é necessário avaliar com precisão a origem das emissões no setor, com o uso de inventários de GEE.

Adicionalmente, o uso intensivo de materiais como aço e cimento impulsiona as emissões industriais associadas. De acordo com Hu (2022), a demanda por esses materiais é uma das principais forças motrizes das emissões industriais. Em 2019, o carbono incorporado nos materiais de construção representou 10% das emissões globais de CO₂, sendo que, em países em desenvolvimento como a China, esse valor chegou a 16% (IEA & UNEP, 2019; Berc, 2021).

Estudos históricos já apontavam a contribuição do setor: Presco (1999, apud Barbosa *et al.*, 2003) estimava que as emissões de CO₂ oriundas da construção civil correspondiam a cerca de 30% do total nas cidades europeias. Dentro desse total, a

indústria do cimento e a do aço respondem cada uma por aproximadamente 7% das emissões. Isso demonstra a importância de priorizar esses dois segmentos em qualquer proposta de transição energética ou descarbonização.

Portanto, considerando sua relevância ambiental e econômica, o setor da construção civil configura-se como área estratégica para o avanço de políticas climáticas. No próximo item, discute-se como os produtos de cimento e aço se tornaram protagonistas das emissões do setor e de que forma novas tecnologias podem mitigar seus impactos.

2.2 Produção de cimento e aço: fontes de emissão

A indústria do cimento

A produção de cimento é uma das atividades industriais mais emissoras de carbono no mundo. No Brasil, estima-se que esse processo seja responsável por cerca de 10% de todas as emissões de CO₂ no país (John, 2005). O clínquer, principal componente do cimento, é produzido a partir da calcinação do calcário, operação que demanda temperaturas superiores a 1.400 °C e resulta na liberação direta de CO₂ pela decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃). Para cada tonelada de clínquer produzida, são consumidos aproximadamente 5,5 GJ de energia e emite uma tonelada de CO₂ (Isaia & Gastaldini, 2004).

Além disso, a produção de cimento consome, em média, 90 kWh de energia elétrica e 0,05 toneladas de vapor por tonelada produzida. No Brasil, com uma produção anual estimada em 38 milhões de toneladas de cimento Portland comum, as emissões totais ultrapassam 22 milhões de toneladas de CO₂ (Toledo, 2004). Ainda que parte da energia térmica utilizada seja oriunda de biomassa (como cavaco de eucalipto), considerada neutra segundo o IPCC (2022), a pegada de carbono do setor permanece elevada.

Esse cenário evidencia o peso significativo do cimento na pegada de carbono da construção civil, especialmente quando se considera que o material está presente em praticamente todas as obras, desde pequenas edificações até grandes projetos de infraestrutura. A elevada demanda energética da etapa de calcinação — em que o calcário é transformado em clínquer — e a liberação direta de CO₂ nesse processo

tornam o cimento um dos alvos prioritários para estratégias de descarbonização do setor. O esquema apresentado na Figura 1 evidencia que o processo de produção de cimento envolve etapas com elevado consumo energético e potencial de emissão de CO₂, sendo a calcinação do calcário, em especial, a fase mais crítica do ponto de vista ambiental (John, 2005; Isaia & Gastaldini, 2004). Essa etapa não apenas demanda temperaturas superiores a 1.400 °C — normalmente obtidas por meio da queima de combustíveis fósseis — como também resulta na liberação direta de dióxido de carbono como subproduto químico da decomposição do carbonato de cálcio (Van Oss & Padovani, 2002; SNIC, 2019).

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de cimento: da extração ao clínquer



Fonte: Elaborado pela autora com base em John (2005), Isaia e Gastaldini (2004) e IEA (2020).

A indústria do aço

No que diz respeito à indústria do aço, importante insumo da construção civil e aliado do cimento, o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, além de possuir uma das maiores reservas de minério de alta qualidade, sendo o nono maior produtor de aço global (IABr, 2021; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2021; Simões E Hidalgo, 2021).

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) da produção de aço representam 7% das emissões relacionadas à energia no mundo (IEA, 2020). Como a demanda por aço deve crescer nos próximos anos (IEA, 2020), as emissões de GEE do setor provavelmente também aumentarão, a menos que as políticas mudem. Para reduzir suas emissões, o setor exigirá grandes investimentos para reduzir suas emissões (Hermwille *et al.*, 2022).

Globalmente, o setor siderúrgico responde por aproximadamente 20% do consumo industrial de energia e 8% do uso total de energia (IEA, 2020). Em 2019, seu consumo de energia foi de 845 Mtep (IEA, 2020). O combustível mais utilizado no setor siderúrgico é o carvão, que representa quase 75% do uso de energia do setor (IEA, 2020). Além do carvão, a eletricidade e o gás natural respondem por quase toda a demanda restante de energia do setor. A eletricidade utilizada no setor siderúrgico representou 5,5% da demanda global em 2019, enquanto o gás natural representou 2,5%. Além disso, a indústria siderúrgica consome quase todo o carvão metalúrgico produzido no mundo e representa aproximadamente 16% da demanda global de carvão (IEA, 2020).

A produção de aço é a principal fonte de emissões de GEE entre os setores industriais brasileiros, respondendo por aproximadamente um quarto das emissões industriais (MCTIC, 2020). Suas principais fontes de energia são carvão (57%), carvão vegetal (18%) e eletricidade (10%) (EPE, 2021).

O uso de estruturas de aço na construção civil pode reduzir o tempo de construção, resultando em economia de custos (Pinho, 2017). Isso ocorre porque as peças de aço são fabricadas em indústrias siderúrgicas, garantindo maior precisão e qualidade, e depois montadas no local da obra (Pinho, 2017). Projeções indicam que a demanda por aço aumentará para mais de 2,5 bilhões de toneladas por ano até 2050, com o maior crescimento ocorrendo nas economias emergentes (IBRAM, 2022). Esse aumento na demanda acontece em um momento em que é necessária uma redução rápida das emissões do setor siderúrgico, a fim de alinhar-se com uma trajetória de emissões zero líquidas até 2050, em conformidade com os objetivos do Acordo de Paris (ONU, 2015). Figura 2 abaixo apresenta o fluxograma de produção de aço.

Figura 2 - Esquema do processo siderúrgico de produção de aço



Fonte: Adaptado de Ferraz, (2003).

Neste processo, um fator que contribui fortemente para as emissões de gases de efeito estufa na produção do aço é o consumo de energia. A fabricação de 1kg de aço em forno de arco elétrico resulta em aproximadamente 462 gramas de CO₂ equivalente, enquanto a produção de 1kg de aço em alto forno gera cerca de 2494 gramas de CO₂ equivalente (Gervásio, 2008).

Reduzir essas emissões requer a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, como a utilização de hidrogênio verde como fonte de aquecimento no processo de fabricação do aço. As emissões de carbono das atividades humanas representam uma ameaça existencial significativa para a civilização moderna (Zhang *et al.*, 2020a). O nível global de emissões de carbono na última década atingiu o nível mais alto já registrado (IPCC, 2022) e sem uma profunda descarbonização imediata em todos os setores, o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5 C até meados do século provavelmente não será alcançado (Ren *et al.*, 2022a).

Uma pesquisa conduzida para o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática estimou que aproximadamente 30% da referência de emissões de CO₂ em edifícios projetadas em 2020 poderiam ser mitigadas mundialmente, com uma relação custo-benefício eficiente, ou seja, como sistemas de aquecimento e eletrodomésticos

mais eficientes. Portanto, explorar esse potencial apenas no setor da construção contribuirá consideravelmente para resolver o problema da mudança climática global. Além disso, desenvolver esses potenciais também trará inúmeros outros benefícios, como a diminuição da poluição atmosférica, melhoria da saúde e redução da mortalidade, melhoria do bem-estar social e segurança energética, entre outros (CBCS, 2014).

Ambos os setores, cimento e aço, apresentam desafios e oportunidades para a transição energética. A introdução do hidrogênio verde como fonte de calor ou agente redutor nos processos industriais é uma das alternativas mais promissoras para a descarbonização, sendo abordada mais adiante nesta dissertação com foco na viabilidade técnica e econômica de sua aplicação no contexto brasileiro.

2.3 O Hidrogênio verde como alternativa sustentável

No contexto da indústria do aço e cimento, o hidrogênio pode ser considerado para uso como um combustível com emissão zero de carbono durante a queima, associando as preocupações ambientais e as limitações na disponibilidade dos combustíveis fósseis (Souza, 2018). Também cita que o hidrogênio está presente em 70% da superfície terrestre, seja em forma de água ou orgânica, e possui alta flexibilidade de produção. Furozaki (2011) aponta que, dependendo das taxas de eficiência de cada processo, a utilização do hidrogênio pode reduzir 8 (oito) vezes as emissões de GEEs e 32 (trinta e duas) vezes a poluição do ar, o que entra em consenso com as ideias do milênio e as propostas da COP26. Os processos em destaque para essa melhora significativa nas emissões de poluentes são eletrólise da água por energia solar fotovoltaica e gaseificação da biomassa, pois os mesmos apresentam muito potencial de implementação no cenário nacional (UNITED NATIONS, 2021).

O hidrogênio é o elemento químico mais comum no universo e o terceiro mais encontrado na superfície da Terra, sendo, portanto, amplamente disponível. Ele ocupa o primeiro lugar na tabela periódica e seu gás, formado por átomos de hidrogênio, é 14,4 vezes mais leve que o ar (Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro, 2021). De fórmula molecular H_2 , o hidrogênio recebeu essa denominação em 1773 por Antoine Lavoisier, sendo a palavra derivada do grego *hydro* e *genes*, significando “gerador de água”. Embora abundante, encontra-se naturalmente apenas em compostos, exigindo

processos químicos específicos para sua obtenção (Lanardi, 2008; Santos & Santos, 2005). É considerado um combustível poderoso, com alta densidade energética por unidade de massa, e sua combustão não gera gases de efeito estufa (Fernandes, 2008).

Os estudos sobre o uso energético do hidrogênio remontam ao século XIX, por volta de 1840. No entanto, suas primeiras aplicações estiveram restritas a setores industriais específicos, como o refino de petróleo e a produção de amônia, sem impactos relevantes para a descarbonização dos processos (Gurllit *et al.*, 2021). Com o passar dos anos, os efeitos ambientais negativos das emissões antropogênicas tornaram-se cada vez mais evidentes, manifestando-se no agravamento do aquecimento global e no derretimento acelerado das calotas polares (Serra, 2007).

Nesse cenário, o hidrogênio limpo tem ganhado relevância nas estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas. Segundo a IRENA (2022a), o hidrogênio e seus derivados poderão representar até 10% do esforço necessário para reduzir as emissões de gases de efeito estufa até 2050, de forma a conter o aquecimento global a 1,5 °C. Estimativas do GECF (2022) indicam que a produção de hidrogênio deve crescer mais de cinco vezes até 2050, sendo que o hidrogênio verde poderá responder por 48% desse volume.

O hidrogênio vem sendo, assim, largamente apontado como a principal opção para a diminuir as emissões de GEE (gases de efeito estufa) em todo o mundo, pois sua produção emite uma quantidade muito menor se comparado aos combustíveis fósseis, visto que a aplicação em larga escala de combustíveis fósseis resulta em significativos impactos ambientais, como emissão de GEE, especialmente do dióxido de carbono (CO₂), e o aumento da poluição urbana, o que faz com que as entidades públicas e governamentais busquem por novas fontes de energias renováveis (Castro *et al.*, 2023). Isso não é uma ideia nova, pois já em 1923, J.B.S Haldane fez uma palestra na universidade de Cambridge na qual defendeu o potencial do hidrogênio como combustível do futuro (Haldane, 1923).

Uma vez que o hidrogênio não é encontrado na natureza na sua forma pura, a obtenção desse gás se dá através de vários tipos de processos. Atualmente, o gás natural é a principal fonte de energia utilizada na produção do hidrogênio, e corresponde a cerca de três quartos do produto global anual de hidrogênio (IEA, 2019). Na Figura 3

apresenta-se a classificação do hidrogênio por cor, de acordo com a sua tecnologia de produção, ou seja, tipo de processo de obtenção.

Figura 3 – Hidrogênio por cor de acordo com a sua tecnologia de produção



Fonte: Adaptado de CASTRO, *et al.* (2023).

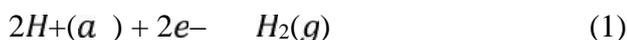
2.4 Aplicações do hidrogênio verde na indústria

É possível analisar através da figura 3, que a produção do hidrogênio não está totalmente isenta da geração de gases prejudiciais ao meio ambiente, pois existem processos para a obtenção do H₂ que emitem esses gases. Diante disso, a utilização do hidrogênio verde como fonte de energia nos setores industriais vem sendo defendida por órgãos competentes como a IRENA (Agência Nacional de Energias Renováveis) que defende que o hidrogênio verde está sendo reconhecido como um vetor chave para o alcance da neutralidade de carbono até 2050, pois ele desempenhará um papel importante na descarbonização de setores difíceis de descarbonizar, como a indústria. Isso porque sua produção pode ser feita por rota que não gera emissão de GEE, visto que é produzido por um processo chamado eletrólise, que consiste na separação do hidrogênio e do oxigênio da molécula da água por um fluxo de corrente contínua com a utilização de eletrodos que ficam imersos em uma solução aquosa alcalina em

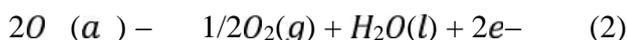
temperatura ambiente (Castro *et al.*, 2023). Vale ressaltar que o hidrogênio só é considerado verde se produzido com o uso de fontes de energia renováveis.

As equações 1, 2 e 3 demonstram como acontece a eletrólise da água. (Brown *et al.*, 2005).

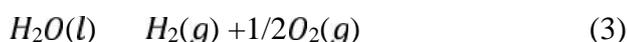
Catodo:



Anodo:



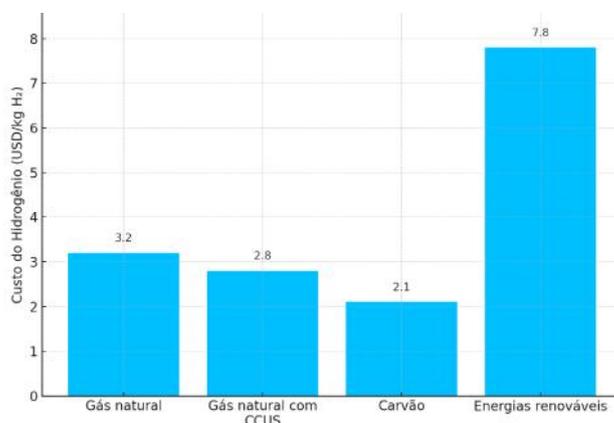
Global:



Ademais, ainda há desafios para a utilização do hidrogênio verde como combustível, pois sua produção ainda é relativamente cara, se comparada às outras formas de obtenção do hidrogênio, para viabilizar essa transição energética é necessário que sejam feitos avanços nas tecnologias de produção, transporte e armazenamento do H₂V (Bezerra, 2021).

A diferença do preço do hidrogênio feito com o uso de combustíveis fósseis para o preço do hidrogênio de baixo carbono é ainda uma barreira que precisa ser superada com o estímulo de políticas públicas (IEA, 2019). O custo do hidrogênio cinza varia de US\$0,5/Kg a US\$1,7/Kg, dependendo do preço do gás natural da região que ele é produzido, o hidrogênio azul tem preço que varia entre US\$1/Kg e US\$2/Kg. Como o H₂V é produzido com o uso de energias renováveis, o seu custo é mais alto variando de US\$ 3/kg a US\$ 8/Kg, esta informação pode ser observada na Figura 4:

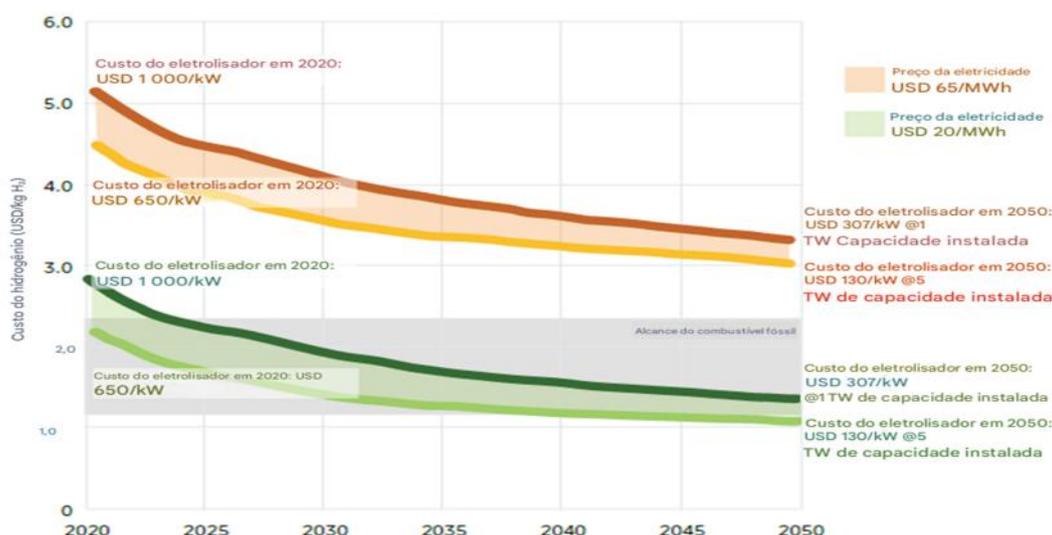
Figura 4 – Comparação dos preços do hidrogênio via gás natural e fontes renováveis.



Fonte: IEA (2019).

Um fator que pode contribuir para que o preço do hidrogênio verde diminua é o crescimento do mercado dos eletrolisadores utilizados na produção do H₂V nos próximos anos, o que trará tanto uma redução de custo do hidrogênio de baixo carbono, como uma maior eficiência dos eletrolisadores (GIZ, 2021). As estatísticas para o hidrogênio verde é que o preço da produção do mesmo caia até o ano de 2050, por conta das reduções de custo dos eletrolisadores e da eletricidade, essa informação pode ser conferida na Figura 5:

Figura 5 - Produção de hidrogênio verde em função da implantação do eletrolisador, custo instalado e preço da eletricidade, constantes ao longo do período 2020-2050.



Fonte: IRENA (2023).

2.5 Desafios e perspectivas para o Brasil e o Maranhão

O impacto global da adoção do hidrogênio verde na redução das emissões de CO₂ mostrado acima pode ser vislumbrado no estado do Maranhão, pois tem uma infraestrutura portuária estratégica, o Porto do Itaqui somada à disponibilidade regional de fontes renováveis (potencial solar e eólico para produção de H₂V, posiciona o estado como local viável para a futura implementação de polos de hidrogênio verde. A institucionalização do Comitê Técnico da Indústria de Baixo Carbono, por meio do Decreto nº 11.547/2023, reforça a direção política nacional voltada à transição energética e à economia de baixo carbono.

No Estado do Maranhão, a construção civil apresenta elevado potencial para incorporar práticas sustentáveis, tanto em escala de canteiro quanto em nível industrial. Iniciativas já em curso incluem a implementação de certificações ambientais como LEED, AQUA-HQE e CASA AZUL, além de estratégias voltadas à gestão de resíduos e ao uso racional da água e da energia. Contudo, práticas estruturais de baixo carbono, como a substituição de combustíveis fósseis por fontes energéticas limpas, permanecem incipientes.

3. JUSTIFICATIVA

Dando continuidade à fundamentação teórica desenvolvida no capítulo anterior, que evidenciou os impactos ambientais associados à cadeia produtiva da construção civil e as oportunidades de mitigação por meio do uso do hidrogênio verde, esta seção apresenta a justificativa deste estudo. A proposta não se limita ao aspecto técnico de substituição energética, mas visa também contribuir com o avanço científico sobre soluções sustentáveis para setores industriais intensivos em emissões. A análise aqui desenvolvida busca preencher lacunas existentes na literatura nacional, especialmente no contexto regional do Maranhão, e colaborar para a formulação de estratégias alinhadas às metas globais de descarbonização.

A construção civil ocupa uma posição estratégica na economia brasileira, sendo responsável por parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) e pela geração de empregos formais. Em 2022, o setor registrou crescimento de 6,9% no PIB e respondeu por aproximadamente 10% das admissões com carteira assinada no país (ABRAIN, 2023). Contudo, esse avanço econômico ocorre paralelamente a um impacto ambiental expressivo, consolidando a construção civil como uma das atividades econômicas mais intensivas em consumo de recursos naturais e emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Estudos apontam que a construção civil é responsável por cerca de 37% das emissões globais de GEE, considerando todas as fases do ciclo de vida das edificações, desde a produção de materiais até a operação e demolição (IEA, 2020). Entre os principais insumos utilizados no setor, o cimento e o aço se destacam como fontes significativas de emissões, sobretudo devido ao alto consumo energético e à liberação direta de dióxido de carbono (CO₂) durante os processos de calcinação e de redução do minério de ferro (John, 2005; IABr, 2021).

No Brasil, um estudo realizado na região Sul estimou emissões de 82,56 kg de CO₂ por metro quadrado construído — desde a preparação do terreno até a conclusão da obra — evidenciando a magnitude da pegada de carbono do setor (Marciel *et al.*, 2018). Além disso, cerca de 47,6% de toda a energia elétrica consumida no país está relacionada ao uso em edificações, o que reforça a necessidade de revisão dos processos construtivos para torná-los mais eficientes e ambientalmente responsáveis (Costa, 2012).

Neste contexto, o hidrogênio verde (H₂V) emerge como alternativa promissora para a transição energética da construção civil. Produzido por eletrólise da água com uso exclusivo de fontes renováveis (energia solar, eólica e hídrica), o H₂V não emite CO₂ durante sua combustão e pode substituir fontes fósseis tanto na geração de calor industrial quanto no transporte de materiais e como insumo direto em processos de produção de cimento e aço (IEA, 2019; Castro *et al.*, 2023).

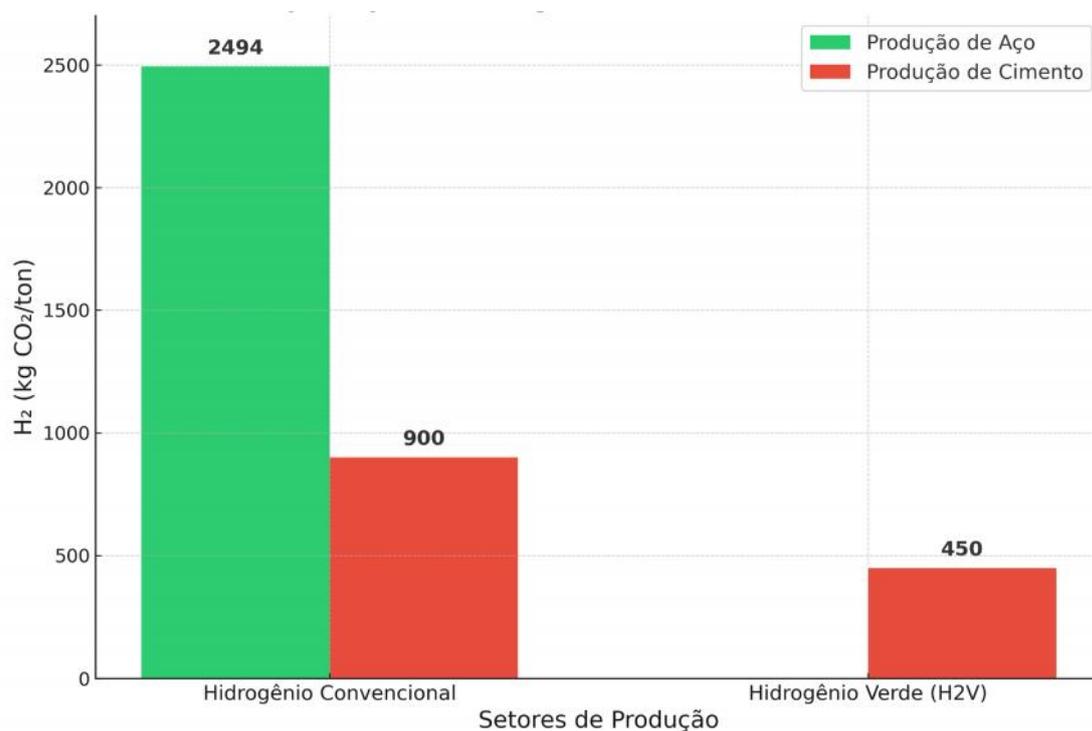
Com base em estudos prévios (Vogl *et al.*, 2018), observa-se o seguinte potencial de redução de emissões com o uso do H₂V:

Produção de aço: A substituição do hidrogênio convencional pelo H₂V pode reduzir em até 100% as emissões diretas de CO₂ no processo de redução de minério de ferro em altos-fornos.

Produção de cimento: Embora a aplicação do H₂V na etapa de calcinação do clínquer não elimine totalmente as emissões (em razão da liberação de CO₂ pela decomposição do calcário), pode-se alcançar uma redução significativa nas emissões associadas ao consumo energético da queima.

A Figura 6 ilustra essa comparação, destacando que, na produção de aço, a substituição do hidrogênio convencional pelo H₂V pode eliminar completamente as emissões diretas de CO₂, reduzindo de aproximadamente 2.494 kg por tonelada para zero.

Figura 6 – Comparação das emissões de CO₂ entre o uso de H₂ convencional e H₂ V na produção de aço e cimento



Fonte: Elaborado pela autora com base em Gervásio (2008).

Siderúrgicas em diversos países já utilizam H₂ V e buscam se instalar em regiões economicamente favoráveis à sua produção, como o Nordeste brasileiro. No Maranhão, por exemplo, encontra-se a planta da empresa Aço Verde Brasil, que já produz aço com baixo impacto ambiental e se prepara para adotar o H₂ V.

No caso do cimento, a adoção do H₂ V na produção de clínquer pode reduzir as emissões de aproximadamente 900 kg de CO₂ por tonelada para cerca de 450 kg. Isso se deve à substituição de combustíveis fósseis (carvão, gás natural, coque) por um combustível limpo que, ao ser queimado, libera apenas vapor d'água. No entanto, o uso do H₂ V na calcinação exige adaptações nos fornos, já que a chama de hidrogênio atinge temperaturas mais elevadas e apresenta maior reatividade (Juangsa *et al.*, 2022), o que requer ajustes no controle térmico e no fluxo de ar.

Considerando que o setor da construção civil responde por cerca de 37% das emissões globais de CO₂ (IEA, 2020) e que o cimento é um dos principais insumos dessa cadeia, a substituição dos combustíveis utilizados na calcinação por H₂ V pode

representar uma redução de 30% a 40% nas emissões do processo de fabricação do cimento (SNIC, 2019). Isso resultaria, em termos agregados, em uma redução potencial de 2% a 4% nas emissões totais da construção civil.

Frente a esse cenário, torna-se fundamental investigar o potencial técnico e ambiental da substituição do hidrogênio convencional pelo hidrogênio verde nos processos produtivos da construção civil. Essa análise deve considerar, de forma específica, os impactos na redução das emissões de CO₂, os desafios tecnológicos, os requisitos de adaptação industrial e a viabilidade regional de adoção dessa nova rota energética.

Portanto, esta pesquisa justifica-se pela necessidade urgente de propor soluções viáveis de descarbonização para o setor da construção civil, alinhadas à realidade do Estado do Maranhão. Ao analisar criticamente os processos convencionais e as possibilidades de aplicação do H₂V, este estudo pretende contribuir para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis, em consonância com os compromissos nacionais e internacionais de mitigação das mudanças climáticas.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Analisar o potencial de descarbonização do setor da construção civil por meio da aplicação do hidrogênio verde (H₂V), considerando os processos produtivos do cimento e do aço no Estado do Maranhão, com base em avaliação técnica, ambiental e regional.

4.2 Objetivos específicos

- Apresentar um descritivo dos principais materiais e insumos utilizados na construção civil no Maranhão, especificamente aço e cimento;
- Descrever a rota de obtenção convencional dos materiais (aço e cimento), a quantidade e o tipo de hidrogênio empregado, quando houver;
- Avaliar o impacto da substituição do hidrogênio convencional pelo hidrogênio verde nos processos produtivos;

- Realizar um estudo de caso sobre o processo de produção de cimento em uma indústria em uma concreteira no estado do Maranhão, analisando comparativamente os métodos convencionais e o potencial de aplicação do H₂V.
- Delinear os requisitos de infraestrutura e as adaptações tecnológicas necessárias para substituir fontes energéticas convencionais por hidrogênio verde (H₂V) na produção de cimento.

5. METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa e aplicada, voltada para a compreensão dos efeitos da introdução do hidrogênio verde (H₂V) como vetor de descarbonização nos processos produtivos da construção civil. O objetivo principal é investigar, por meio de uma análise detalhada, como essa tecnologia emergente pode contribuir para a redução das emissões de carbono, especificamente nos processos industriais de produção de cimento no Estado do Maranhão. A metodologia segue a taxonomia proposta por Vergara (2020), que classifica as pesquisas quanto aos meios e aos fins:

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa será desenvolvida de forma bibliográfica, exploratória e por meio de um estudo de caso. Sendo eles:

- Bibliográfica: Realizar revisão da literatura que abrange artigos e periódicos científicos relevantes para a área de construção civil e descarbonização, além de documentos técnicos que fundamentam as informações necessárias para a pesquisa. Esta revisão fornecerá o embasamento teórico sobre o uso do H₂V e sua aplicabilidade na construção civil.
- Exploratória: Investigar um tema emergente, considerando que, embora existam estudos sobre o hidrogênio verde, sua aplicação para a descarbonização em obras da construção civil ainda é incipiente. Este caráter exploratório visa aprofundar o entendimento sobre as potencialidades do H₂V em cenários específicos da indústria de construção.
- Estudo de Caso: Conduzir análise em uma fábrica de cimento localizada em São Luís, capital do estado do Maranhão. A planta selecionada opera exclusivamente

com moagem de clínquer importado, sem produção local de clínquer, o que configura um perfil de emissões diferenciado, permitindo uma análise comparativa entre métodos convencionais de produção e a projeção da inserção do H₂V nesses processos, com foco na redução de emissões de carbono e na viabilidade técnica e econômica. O estudo de caso qualitativo permite insights detalhados sobre a complexidade do processo e abre espaço para reflexão sobre a implementação de novos processos de descarbonização (Eisenhardt, 1989; Miles *et al.*, 2015).

A análise será conduzida em empresas de grande porte do setor de cimento e concreto na construção civil maranhense, sendo a metodologia de estudo de caso escolhida por sua capacidade de fornecer uma compreensão profunda de fenômenos novos e complexos, elucidando como e por que ocorrem (Patton, 2002). Esse método possibilitará, ainda, discutir os impactos do carbono nas atividades de construção e os benefícios ambientais da adoção do H₂V (Corbin & Strauss, 1990).

Caracterização da área de estudo: A planta analisada está situada no Polo Industrial de São Luís, próxima ao Porto do Itaqui, o que favorece a logística de importação de clínquer oriundo de países do Mediterrâneo. A fábrica apresenta uma capacidade de produção de cerca de 460 mil toneladas anuais de cimento, operando com 95% de utilização instalada e utilizando energia elétrica da rede local e vapor gerado por biomassa (cavacos de eucalipto). Essa configuração torna a planta relevante para avaliar os impactos logísticos e energéticos no ciclo de vida do cimento.

A análise dessa planta permite uma abordagem diferenciada da problemática da descarbonização, destacando como a substituição de insumos e fontes energéticas convencionais por alternativas como o hidrogênio verde (H₂V) pode impactar tanto os processos produtivos quanto a cadeia logística associada. Com base em dados fornecidos pela própria indústria, a seção a seguir apresenta a caracterização da planta, os materiais utilizados, o processo produtivo e as estimativas de emissão de CO₂ por categoria. Em seguida, avaliam-se os cenários de mitigação com uso do H₂V, culminando em uma proposta de reestruturação produtiva regional com uso de energia renovável e produção local de clínquer, buscando alinhar a indústria cimenteira maranhense às metas globais de neutralidade climática.

A análise do estudo de caso será conduzida em etapas:

1. **Coletar e validar os dados:** Os dados primários foram coletados por meio de visita técnica *in loco* à fábrica, com acompanhamento de engenheiros de processo e acesso a documentos operacionais internos. Foram obtidas informações sobre:

- J Consumo energético por tipo de fonte;
- J Procedência e volume dos insumos;
- J Eficiência dos equipamentos;
- J Volume de produção mensal e anual;
- J Práticas operacionais e planos de sustentabilidade em curso.

Além disso, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com membros da equipe técnica da planta, assegurando uma triangulação entre dados empíricos, observações diretas e evidências documentais. Os dados secundários complementares foram extraídos de relatórios ambientais da empresa e publicações setoriais.

2. **Quantificar as emissões de carbono:** O estudo consistiu na análise quantitativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas aos processos convencionais de produção de cimento na empresa participante. Para isso, foram utilizados dados obtidos durante uma visita técnica *in loco*, realizada com o apoio de engenheiros de processo, que forneceram informações técnico-operacionais relevantes. Entre os dados considerados estão o consumo energético, as matérias-primas utilizadas e as tecnologias empregadas. Essas informações fundamentaram a estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂), a partir da aplicação de diretrizes metodológicas amplamente reconhecidas no âmbito internacional, com destaque para os parâmetros do GHG Protocol e as orientações técnicas do IPCC (2022). A quantificação considera as principais fontes emissoras relacionadas ao processo produtivo:

- J Consumo de energia elétrica na moagem: estimado com base em medições operacionais (40 kWh/tonelada de cimento) e aplicado o fator médio de emissão da distribuidora Equatorial (0,100 tCO₂/MWh).
- J Transporte marítimo internacional do clínquer, com distância média de 6.500 km e fator de emissão de 0,01 kg CO₂/ton·km.
- J Transporte rodoviário do Porto do Itaqui até a planta (20 km) com fator de emissão de 0,15 kg CO₂/ton·km.

- J Emissões indiretas associadas à produção dos aditivos (gesso, escória, cinzas volantes).
- J Perdas operacionais e ineficiências, como desgaste de equipamentos e subutilização de processos.

Esses dados permitiram estimar as emissões totais por tonelada de cimento moído, chegando a aproximadamente 97 kg CO /t.

3. **Avaliar o impacto da substituição pelo H₂V:** Com base nas emissões estimadas na etapa anterior, esta fase buscará avaliar o potencial de redução de CO com a substituição de fontes energéticas convencionais pelo hidrogênio verde (H V). Serão utilizados dados técnico-científicos sobre consumo energético e fatores de emissão relacionados ao H V, além de projeções disponíveis na literatura especializada. A análise será conduzida por meio de simulações comparativas, permitindo estimar cenários de mitigação e verificar a viabilidade de implementação do H V no contexto produtivo estudado.

4. **Propor a inserção do H₂V em novos processos:** A partir da análise comparativa entre o cenário atual e as projeções de uso do hidrogênio verde, esta etapa será dedicada à elaboração de propostas para a inserção do H V em etapas do processo produtivo que ainda não o utilizam. Serão consideradas as possibilidades de substituição energética, adaptação tecnológica e ganhos ambientais associados. As propostas serão fundamentadas em estudos de viabilidade técnico-econômica e nas melhores práticas identificadas na literatura científica, considerando o contexto específico da planta analisada e os desafios regionais de infraestrutura e logística.

Quanto aos fins, a pesquisa é classificada como descritiva e explicativa. Como dito:

- Descritiva - Apresentar os benefícios do uso do H₂V na construção civil, com foco nos impactos ambientais e nas práticas vigentes que podem ser transformadas com a aplicação desse recurso. A fundamentação teórica embasa essa descrição, explorando as práticas atuais e o potencial de mitigação de emissões com o uso do H₂V. Busca detalhar o perfil atual de emissões da indústria analisada, bem como os impactos do transporte e uso energético na moagem de cimento. Apresenta ainda os potenciais ganhos ambientais com a adoção de tecnologias sustentáveis.

- Explicativa - Estabelecer relações entre a literatura revisada e as práticas adotadas por empresas que já utilizam hidrogênio em suas atividades, buscando entender o efeito direto da introdução do H₂V nas operações de construção. Procura estabelecer relações causais entre a introdução do hidrogênio verde e a redução efetiva das emissões, identificando os fatores que favorecem ou dificultam sua adoção. A análise é conduzida à luz das evidências teóricas e do estudo de caso.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O setor da construção civil configura-se como um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEE), em função da elevada intensidade carbônica inerente aos processos de produção e utilização de insumos estratégicos, como o aço e o cimento. Neste capítulo, apresentam-se os resultados da presente investigação, com ênfase na quantificação das emissões nos processos produtivos convencionais e na estimativa do potencial de mitigação decorrente da substituição parcial ou integral de fontes energéticas fósseis pelo hidrogênio verde (H V). A análise será corroborada pelo estudo de caso que é direcionado para vislumbrar as possibilidades de aplicação dessa tecnologia em ambientes industriais concretos, considerando as especificidades técnicas e estruturais do Estado do Maranhão.

6.1 Emissões e reduções possíveis nas indústrias do cimento e do aço

A avaliação preliminar das emissões associadas à produção de insumos estratégicos na construção civil permite dimensionar a contribuição relativa de cada processo nas emissões setoriais de CO₂. O presente panorama apresenta dados consolidados sobre as rotas produtivas convencionais de aço e cimento, acompanhados de estimativas teóricas de redução de emissões com a adoção do hidrogênio verde (H V) como alternativa energética. O Quadro 1, sintetiza esses parâmetros comparativos, constituindo base para as análises subsequentes deste capítulo.

Quadro 1 - Materiais da construção civil (aço e cimento) com uso de hidrogênio

Material	Uso na Construção	Emissão Convencional (kg CO₂ /t)	Uso do Hidrogênio	Redução Estimada (%)	Emissão com Hidrogênio (kg CO₂ /t)

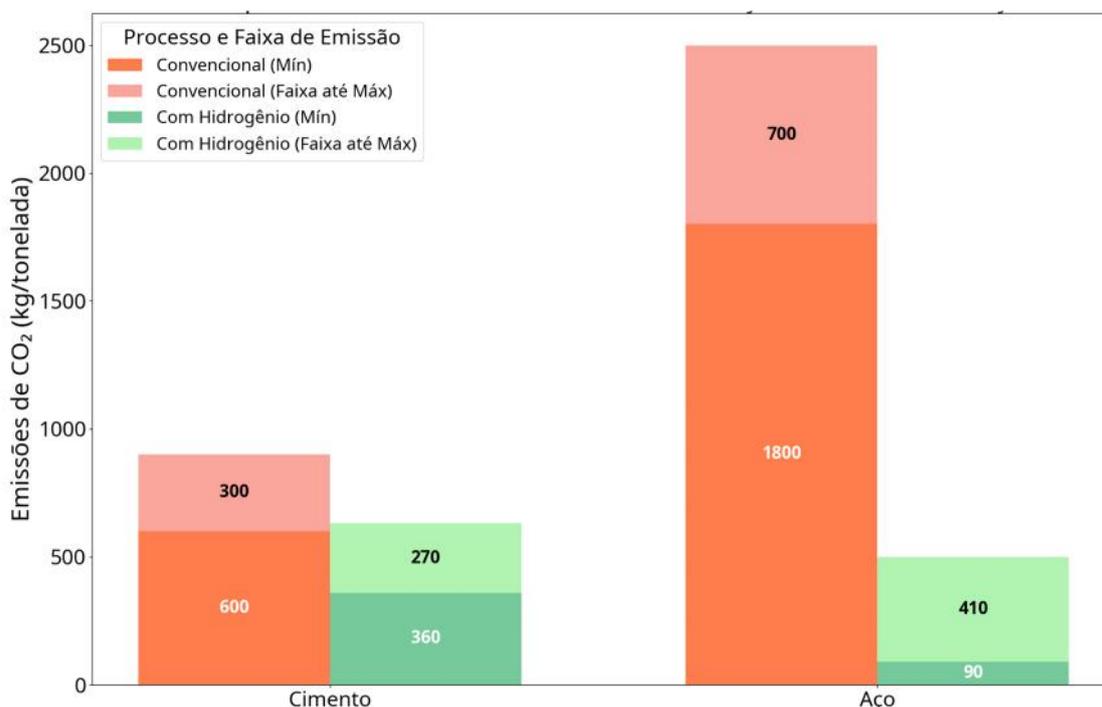
Aço	Estruturas, ferragens	1.800 - 2.500	Redução direta do minério de ferro (DRI)	80 - 95%	90 - 500
Cimento	Concreto, argamassa	600 - 900	Energia térmica nos fornos de clínquer	30 - 40%	360 - 630

Fonte: Elaborado pela autora com base em IEA (2022), IRENA (2023), GCCA (2021).

A síntese apresentada no Quadro 1 permite dimensionar, de forma comparativa, o potencial de mitigação das emissões de CO₂ a partir da substituição de rotas convencionais por alternativas baseadas no uso do hidrogênio verde (H₂V). No setor siderúrgico, as emissões associadas à produção de aço — tradicionalmente situadas entre 1.800 e 2.500 kg de CO₂ por tonelada — estão fortemente vinculadas ao uso de coque como agente redutor (IEA, 2022; GCCA, 2021). Com a adoção do H₂V em processos de redução direta do minério de ferro (DRI), esse patamar pode ser reduzido em até 95%, alcançando emissões inferiores a 500 kg de CO₂ por tonelada, conforme estimativas consolidadas na literatura (IRENA, 2023).

No setor cimenteiro, embora o impacto da substituição seja menos expressivo em termos percentuais, o uso de H₂V como fonte térmica nos fornos de clínquer possibilita uma redução entre 30% e 40% nas emissões, tradicionalmente situadas na faixa de 600 a 900 kg de CO₂ por tonelada de cimento. Essa mitigação ocorre majoritariamente pela troca da matriz energética fóssil, sem alterar as emissões processuais decorrentes da decomposição térmica do carbonato de cálcio (SNIC, 2019; Van Oss & Padovani, 2002). A Figura 7, ilustra com clareza o impacto potencial do uso de hidrogênio verde na produção de aço e cimento.

Figura 7 - Materiais (aço e cimento) com suas emissões de CO₂ nos processos convencionais, com uso do hidrogênio verde e suas reduções.



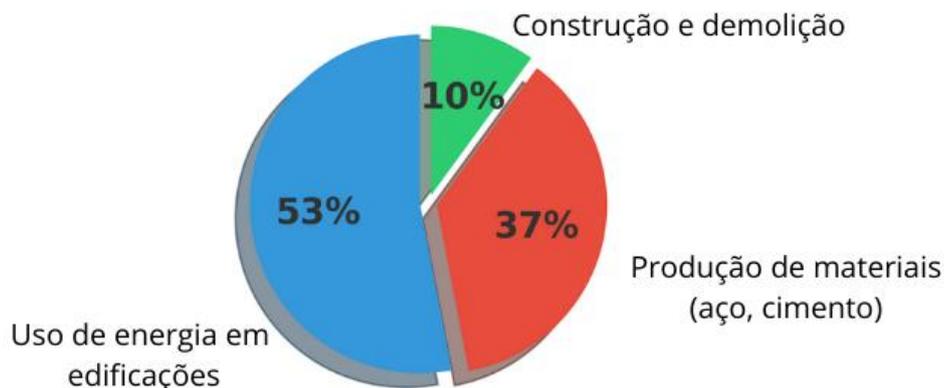
Fonte: Autora, 2025.

Esses dados, na Figura 7, confirmam o papel estratégico do H V como vetor de descarbonização dos principais insumos empregados na construção civil. De modo que, para que tal potencial seja devidamente qualificado, torna-se necessário, antes, compreender de forma aprofundada o perfil de emissões que caracteriza os processos produtivos atualmente empregados. A seção a seguir se dedica a essa análise, com foco nas etapas convencionais de produção de cimento e aço.

6.2 Análise das emissões de carbono nos processos convencionais de produção cimento e aço

Quanto à pegada de carbono da construção civil, sintetiza na Figura 8 a divisão das emissões de CO₂ no setor de construção civil, destacando três principais fontes, que são a produção de materiais, atividades de construção e demolição e o uso de energia em edificações:

Figura 8 – Fontes de emissões de CO₂ no setor de construção civil



Fonte: Elaborado pela autora com base em PNUMA (2022).

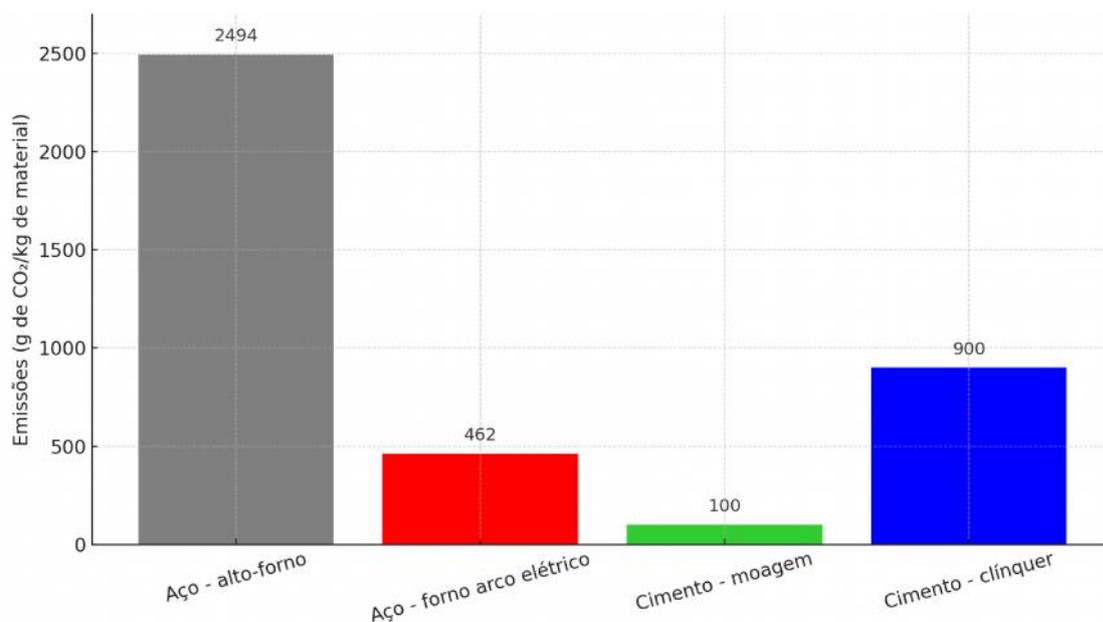
Produção de materiais (Aço, Cimento): Representa cerca de 37% das emissões totais, indicando o impacto significativo desses materiais na emissão de gases de efeito estufa.

Construção e demolição: Responsável por aproximadamente 10% das emissões, refletindo o impacto dos processos de construção e descarte de materiais.

Uso de energia em edificações: Com 53%, esta categoria abrange o consumo energético ao longo do ciclo de vida dos edifícios.

Focando especificamente no aço e cimento, a Figura 9 mostra valores da quantidade de dióxido de carbono emitida nos processos convencionais de produção de aço e cimento, expressa em gramas por quilograma de material produzido. Observa-se que o processo de alto-forno para produção de aço é o mais intensivo em emissões de CO₂, seguido pela produção de clínquer na fabricação de cimento. A comparação evidencia os desafios ambientais associados a esses processos e reforça a importância de alternativas sustentáveis, como o uso de hidrogênio verde, para mitigar as emissões no setor da construção civil.

Figura 9 – Emissões de CO₂ nos processos convencionais de produção de aço e cimento



Fonte: Elaborado pela autora com base em Gervásio (2008) e IEA (2022).

A análise dos dados apresentados na Figura 9 revela diferenças significativas nas emissões de CO₂ entre os processos convencionais de produção de aço e cimento. Assim, passamos a discutir cada um desses dois processos convencionais de produção de aço e cimento com foco em suas emissões de gases estufa.

Nesta seção, dedicada exclusivamente ao aço, de acordo com o artigo “Descarbonização do setor da construção civil através do uso de hidrogênio verde na produção do aço” (Santos *et al.*, 2024), derivado deste trabalho e reproduzido no Anexo I. Neste artigo, (Santos *et al.*, 2024) aprofunda-se nos aspectos discursivos da temática, destacando o hidrogênio verde como uma alternativa promissora para a descarbonização do setor siderúrgico. Produzido por eletrólise da água com fontes renováveis, este vetor energético pode substituir o carvão metalúrgico como agente redutor no processo de fabricação do aço, eliminando emissões diretas de CO₂. O estudo evidencia que essa rota tecnológica, associada ao chamado aço verde, posiciona o setor siderúrgico como protagonista na transição energética global. Além disso, o artigo, em anexo, menciona experiências internacionais, como o projeto HYBRIT, na Suécia, que produziu pela primeira vez, em 2021, aço sem o uso de combustíveis fósseis, reforçando o potencial real dessa inovação no enfrentamento das mudanças climáticas.

Com base nessas referências e na fundamentação teórica apresentada, a seguir serão descritos os principais processos produtivos do aço, com ênfase em suas emissões específicas de CO₂ e no potencial de mitigação por meio do uso do hidrogênio verde.

6.2.1 Processos de produção de aço

A produção de aço é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor industrial, em função do elevado consumo energético e do uso intensivo de carvão metalúrgico como agente redutor. No Brasil, o setor siderúrgico é responsável por aproximadamente um quarto das emissões industriais de CO₂, com a matriz energética baseada majoritariamente em carvão (57%), carvão vegetal (18%) e eletricidade (10%) (IEA, 2020).

Historicamente, a indústria siderúrgica tem sido uma das maiores emissoras de GEE, contribuindo de forma significativa para o aquecimento global. Entretanto, iniciativas voltadas à descarbonização vêm ganhando destaque, especialmente com o avanço da produção do chamado aço verde — resultante de processos que utilizam fontes de energia renováveis, como hidrogênio verde ou carvão vegetal, em substituição ao carvão mineral.

O processo convencional de produção de aço ocorre, predominantemente, por meio da rota do alto-forno e do conversor, em que o minério de ferro é reduzido com o uso de coque. Esse método é altamente emissivo, gerando aproximadamente 2.494 kg de CO₂ por tonelada de aço produzido. Além da queima do carvão, reações químicas associadas à produção também contribuem para as emissões totais.

Alto-forno (2.494 kg CO₂ /t): O método mais tradicional e emissivo. Utiliza carvão coque como redutor para transformar o minério de ferro em ferro-gusa, gerando elevadas quantidades de CO₂. Além das emissões provenientes da combustão do carvão, o processo envolve reações químicas que também liberam CO₂.

Em contraste, outra rota tecnológica vem ganhando espaço: a produção via forno de arco elétrico, que utiliza sucata metálica como matéria-prima em vez de minério de ferro. Esse processo apresenta menor intensidade de carbono, com emissão média de

462 kg de CO por tonelada de aço produzido, sendo essa pegada ainda menor quando a eletricidade utilizada provém de fontes renováveis.

Forno de arco elétrico (462 kg CO /t): Alternativa menos emissiva que o alto-forno. Utiliza sucata metálica e depende fortemente da matriz energética da eletricidade empregada. Quando abastecido por fontes renováveis, pode reduzir ainda mais as emissões de CO .

Neste contexto, o uso do hidrogênio verde como redutor primário no lugar do carvão se apresenta como uma das soluções mais promissoras para a descarbonização do setor. Essa tecnologia pode eliminar as emissões diretas de CO nos processos de redução do minério de ferro, possibilitando a produção de aço com baixa ou nenhuma emissão. O chamado aço verde.

O Brasil, nesse cenário, possui vantagens estratégicas na transição para o aço verde: uma matriz energética predominantemente renovável, disponibilidade de carvão vegetal certificado oriundo de florestas plantadas e excelentes condições climáticas e hídricas para geração de energia solar, eólica e hidrogênio verde.

O aço verde representa, portanto, um avanço essencial rumo à neutralidade de carbono na indústria pesada. O uso do hidrogênio como vetor energético não só reduz drasticamente as emissões de CO , como também posiciona o setor siderúrgico como protagonista na transição energética global. Para o Brasil, trata-se de uma oportunidade concreta de liderar essa transformação, aliando crescimento econômico, responsabilidade ambiental e inovação tecnológica.

6.2.2 Emissões de CO₂ e tecnologias de descarbonização na produção de aço

A indústria siderúrgica é uma das maiores fontes de emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com 25% das emissões industriais diretas de CO e 6% das emissões globais antropogênicas. Essas emissões estão associadas principalmente a:

1. Redução química do minério de ferro: Utilização de coque (carvão) em altos-fornos, que libera CO por meio das reações 4 e 5:





2. Consumo de combustíveis fósseis: Para geração de calor e eletricidade em processos como sinterização e laminação.

3. Transporte de insumos: Uso de caminhões a diesel e navios para movimentar minério, carvão e produtos finais.

6.2.3 Tecnologias de descarbonização para o setor do aço

A produção de aço tradicionalmente depende de combustíveis fósseis, como carvão e coque, responsáveis por ~1,8 toneladas de CO por tonelada de aço produzido. No entanto, a substituição parcial ou total desses combustíveis por biomassa (madeira, resíduos florestais) tem ganhado atenção como alternativa de menor carbono.

A indústria siderúrgica enfrenta um desafio crucial na busca pela descarbonização. Para atingir esse objetivo, diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas e implementadas, destacando-se especialmente o papel do hidrogênio verde como agente redutor. Uma das inovações mais significativas é a substituição do coque pelo hidrogênio verde, que é produzido através da eletrólise da água utilizando energia renovável. Este método permite a redução direta do minério de ferro (DRI – Direct Reduced Iron), eliminando emissões de CO. A reação química que ocorre é a seguinte:



Além disso, vários projetos em escala estão sendo implementados para explorar essa tecnologia. O projeto SALCOS, localizado na Alemanha, utiliza energia eólica e solar para produzir hidrogênio verde em eletrolisadores, integrando-o em fornos de redução direta. No Japão, o projeto COURSE50 combina a captura de CO proveniente de gases de alto-forno com a utilização de hidrogênio, conseguindo uma redução nas emissões de 30%.

Outra estratégia importante é a implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e conversão de carbono (CCU). A CCS envolve a captura de CO emitido durante os processos de produção em altos-fornos e seu armazenamento geológico, como demonstrado no projeto Brevik da HeidelbergCement

na Noruega. Por outro lado, a CCU se foca na conversão do CO em produtos químicos, como metanol, utilizando energia renovável.

A eficiência energética também desempenha um papel crítico na descarbonização do setor. O uso de moinhos verticais de rolos pode levar a uma redução de 30-50% no consumo de energia em comparação com os moinhos de bolas tradicionais. Outras estratégias incluem a recuperação de calor residual, que reaproveita energia térmica de gases de exaustão para gerar eletricidade, e a reciclagem de aço, que pode reduzir a necessidade de minério virgem, diminuindo as emissões em 50-75%.

A utilização de biomassa como substituto parcial do carvão em processos de redução é uma opção adicional. A aplicação de escória granulada e cinzas volantes, resíduos da siderurgia e de termelétricas, como aditivos no cimento também contribui para a redução da pegada de carbono do aço.

Tecnicamente, o CO liberado na queima de biomassa é reabsorvido pelo crescimento de novas árvores, tornando-o neutro. Porém, emissões indiretas (transporte, processamento) e práticas de manejo florestal insustentáveis podem comprometer esse balanço (IEA,2018).

A descarbonização da indústria siderúrgica é um esforço que integra o uso de hidrogênio verde, tecnologias de captura de carbono, eficiência energética e biomassa. Iniciativas como SALCOS e COURSE50 demonstram a viabilidade técnica dessas abordagens. Contudo, o sucesso em larga escala dependerá de políticas públicas, cooperação internacional e investimentos em pesquisa e desenvolvimento. A transição para o "aço verde" não apenas reduzirá as emissões, mas também posicionará o setor como um líder na economia de baixo carbono.

6.2.4 Processo de produção de cimento portland

A produção de cimento é reconhecidamente uma das atividades industriais mais intensivas em emissões de dióxido de carbono (CO₂), sendo responsável por aproximadamente 8% das emissões globais. Embora a maior parcela dessas emissões esteja associada à produção do clínquer (etapa de calcinação do calcário, que libera CO₂ por descarbonatação e consumo de combustíveis fósseis), a etapa de moagem do clínquer com outros agregados também contribui para o balanço carbônico do processo.

Em fábricas que apenas recebem o clínquer pronto e realizam sua moagem, as emissões podem ser menores, mas não são desprezíveis.

1. Moagem (100 kg CO /t)

- A moagem do cimento gera emissões relativamente baixas, provenientes do consumo de eletricidade necessária para o processo de moagem dos materiais.

2. Produção de Clínquer (900 kg CO /t)

- A produção de clínquer é a principal fonte de emissões na fabricação do cimento, pois envolve a calcinação do calcário (CaCO_3), liberando CO diretamente na atmosfera.
- Além das emissões químicas, o uso de combustíveis fósseis nos fornos também contribui para o alto impacto ambiental.

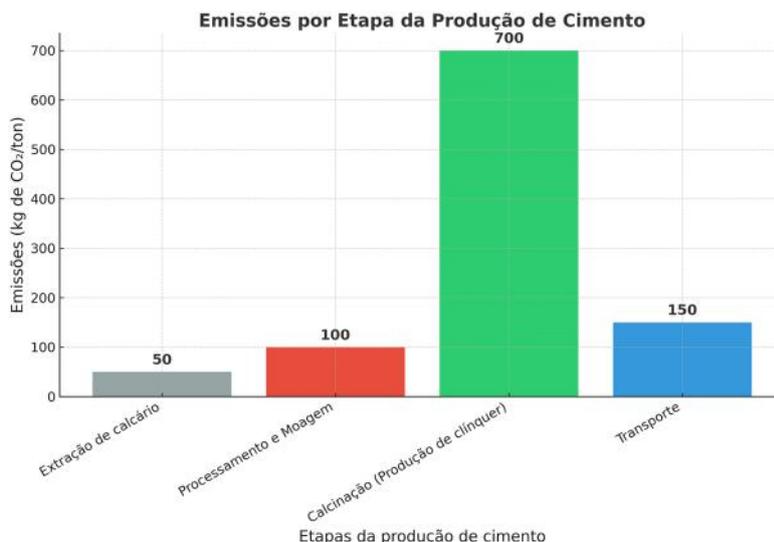
6.2.5 Emissões de CO₂ e tecnologias de descarbonização na produção de cimento

A produção de cimento, assim como a produção de aço, também contribui significativamente para as emissões de CO₂, sendo responsável por 7% a 10% das emissões globais de dióxido de carbono, especialmente devido ao processo de calcinação do calcário para a produção de clínquer. No Brasil, o setor de cimento é responsável por uma parcela considerável das emissões de carbono, principalmente devido ao consumo de energia e à liberação de CO durante o processo de calcinação do CaCO_3 (IEA,2020).

O processo de fabricação de cimento Portland, amplamente utilizado na construção civil, inclui etapas como a extração de calcário, britagem e moagem, além da calcinação a temperaturas elevadas, em torno de 1.450 °C.

A Figura 10, abaixo, ilustra as emissões de CO₂ nas diferentes etapas da produção de cimento, expressas em quilogramas daqueles gases por tonelada de clínquer produzido.

Figura 10 – Emissões de CO₂ nas diferentes etapas da produção de cimento



Fonte: Elaborado pela autora com base em COSTA (2012), IEA (2022) e GCCA (2021).

As principais etapas e suas emissões são:

Extração de Calcário: Contribui com 50 kg de CO por tonelada de clínquer.

Processamento e Moagem: Responsável por cerca de 100 kg de CO por tonelada de clínquer.

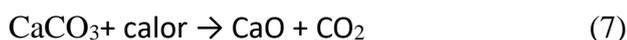
Calcinação (Produção de Clínquer): A etapa mais intensiva em emissões, com aproximadamente 700 kg de CO por tonelada de clínquer.

Transporte: Representa 150 kg de CO por tonelada de clínquer.

Esse gráfico destaca como as etapas de calcinação e moagem, necessária para a produção de clínquer, são as principais fontes de emissões no processo de fabricação de cimento.

Assim, passaremos então a lançar luzes sobre essas duas principais etapas que mais emitem gases estufa no processo industrial de produção do cimento, ou seja, a calcinação e a moagem.

Quanto ao processo de calcinação, ocorre, principalmente que o carbonato de cálcio (CaCO₃) é transformado em cal (CaO), liberando CO₂ como subproduto, conforme a reação 4 abaixo:



Nesta etapa, cada tonelada de clínquer produzido libera aproximadamente 0,6 a 1 tonelada de CO₂ na atmosfera, o que reforça o impacto ambiental significativo do setor (Van Oss e Padavoni, 2002).

Como visto na bibliografia, a moagem é a segunda etapa que mais libera dióxido de carbono. Nesta etapa, que ocorre após a produção do clínquer, ainda existem fontes de emissão de CO₂ no processo. O clínquer é misturado com outros materiais, como gesso e possivelmente aditivos, e moído até formar o pó fino que conhecemos como cimento. Moer o clínquer e os agregados requer máquinas pesadas, como moinhos de bolas ou rolos, que consomem eletricidade. Nos processos convencionais a eletricidade consumida nesta etapa é gerada a partir de combustíveis fósseis, contribuindo significativamente para emissões de CO₂. Em nosso estudo de caso veremos os números envolvidos neste processo no que diz respeito a consumo e emissões.

Durante a moagem, especialmente se houver umidade ou condições que favoreçam reações químicas, pode ocorrer alguma liberação adicional de CO₂ advindo do próprio clínquer como residual do processo de calcinação. No entanto, isso seria mínimo comparado à etapa de produção do clínquer.

6.2.6 Fontes de emissão de CO₂ na moagem de cimento

O processo de moagem do clínquer, que envolve a adição de aditivos como gesso e escórias, é uma etapa crucial na produção de cimento, mas também é responsável por uma significativa emissão de CO₂. Essa emissão provém de várias fontes, que vão desde o consumo de energia até o transporte dos insumos.

A moagem mecânica é uma atividade que exige grande quantidade de energia, geralmente fornecida por moinhos de bolas ou rolos. Se a eletricidade utilizada é gerada a partir de combustíveis fósseis, como carvão ou gás natural, as emissões indiretas de CO₂ aumentam consideravelmente.

Após a produção do clínquer em fornos, este deve ser transportado até a unidade de moagem. Os veículos utilizados, como caminhões a diesel, trens ou navios, também geram emissões de CO₂, especialmente em longas distâncias.

Durante o processo de calcinação, o calcário pode não ser completamente decomposto, resultando em traços de carbonato de cálcio (CaCO₃) no clínquer. Quando

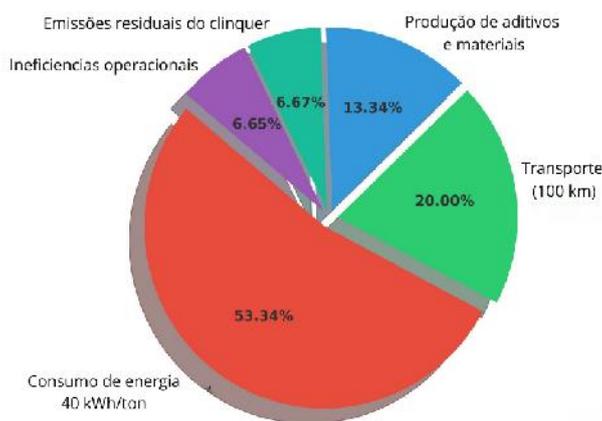
há presença de umidade ou calor residual durante a moagem, reações secundárias podem ocorrer, liberando pequenas quantidades de CO .

A produção de aditivos, como gesso, escória de alto-forno e cinzas volantes, quando realizada utilizando energia fóssil, contribui para emissões indiretas ao ciclo de vida do cimento.

Fatores como moinhos desregulados, desgaste de equipamentos ou processos subótimos podem resultar em um maior consumo de energia, elevando as emissões associadas.

Para facilitar a compreensão das contribuições de cada fonte de emissão de CO na etapa de moagem do cimento, considera-se o exemplo de uma fábrica que consome 50 kWh por tonelada de cimento. Quando essa energia é proveniente de uma matriz elétrica baseada em carvão, estima-se uma emissão de 40 kg de CO por tonelada somente nessa fase do processo.

Figura 11 - Fontes de emissão de CO na moagem de cimento



Fonte: Organizado pela Autora, 2025.

A Figura 11 evidencia as principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO) relacionadas ao processo de moagem de cimento, um dos estágios finais da cadeia produtiva desse insumo essencial à construção civil. A análise dos dados revela que, embora o processo de moagem não envolva diretamente a calcinação – etapa mais intensiva em carbono – ele ainda representa uma contribuição significativa às emissões totais da indústria cimenteira.

A principal fonte identificada é o consumo de energia elétrica, responsável por cerca de 40 kg de CO por tonelada de cimento, representando mais da metade do total

emitido. Este número está diretamente ligado à intensidade de carbono da matriz energética utilizada, que, neste caso, é baseada em carvão mineral, uma das fontes mais poluentes.

Em seguida, tem-se o transporte do clínquer e insumos, com uma média estimada de 15 kg de CO₂ por tonelada de cimento, considerando um deslocamento de 100 km. Esta emissão está diretamente relacionada à logística da fábrica e pode variar conforme a localização geográfica e os modais de transporte utilizados.

A produção de aditivos e materiais secundários, frequentemente negligenciada, representa cerca de 10 kg de CO₂ por tonelada, destacando a importância de considerar toda a cadeia de suprimentos nos cálculos de emissões.

As emissões residuais do clínquer, apesar de menores, também contribuem com aproximadamente 5 kg de CO₂ por tonelada, refletindo os restos do processo de produção anterior que permanecem ativos durante a moagem.

Por fim, as ineficiências operacionais adicionam mais 5 kg de CO₂, evidenciando que práticas operacionais inadequadas ou o uso de equipamentos obsoletos podem impactar negativamente o desempenho ambiental da planta.

Para simplificação, calculamos a emissão total a partir do transporte (100 km) e as emissões totais seriam aproximadamente 75 kg CO₂ por tonelada de cimento (40 + 15 + 5 + 10 + 5). Essa quantificação ilustra a complexidade do processo e reforça a necessidade de estratégias integradas de descarbonização, como a eletrificação com fontes renováveis, o uso de transportes de baixo carbono, a otimização de processos e a substituição de insumos por alternativas com menor pegada ambiental.

6.3 Tecnologias de descarbonização no setor cimenteiro - Potencial de redução de emissões com a substituição pelo hidrogênio verde (H₂V)

A descarbonização da indústria do cimento é um dos desafios centrais na transição para uma economia de baixo carbono, dada a sua elevada contribuição para as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). Nesse contexto, embora a etapa de moagem não seja a mais intensiva em carbono, por não envolver combustão direta e ser predominantemente elétrica, sua descarbonização por meio do uso de hidrogênio verde

tem se tornado um tema emergente e relevante, principalmente no que se refere à integração dessa fonte energética em diversas frentes do processo produtivo.

Uma das estratégias mais promissoras consiste na utilização de energia renovável para alimentar a moagem, substituindo fontes fósseis presentes na matriz elétrica. O hidrogênio verde pode atuar como vetor energético ao viabilizar a geração de eletricidade limpa, especialmente em regiões com fontes renováveis intermitentes. Tecnologias como células a combustível permitem a conversão direta de hidrogênio em eletricidade para acionamento de moinhos. Além disso, o armazenamento sazonal de energia, através da eletrólise da água nos períodos de excedente renovável, possibilita o suprimento contínuo de energia limpa para a moagem, mesmo em períodos com baixa produção solar ou eólica. A substituição integral da energia elétrica por fontes renováveis permitiria a eliminação total das emissões indiretas associadas a essa etapa.

Adicionalmente, o hidrogênio verde pode ser aplicado na produção de aditivos com menor pegada de carbono, contribuindo indiretamente para a sustentabilidade da moagem. Muitos aditivos empregados nesse estágio, como escórias granuladas ou cinzas volantes, demandam processos industriais que ainda utilizam combustíveis fósseis. O uso de hidrogênio como substituto térmico em fornos de resfriamento rápido de escória ou em processos de secagem e ativação térmica de cinzas volantes representa uma oportunidade para reduzir as emissões associadas à cadeia de suprimentos.

Embora a moagem seja majoritariamente um processo mecânico, algumas unidades industriais utilizam calor para a secagem de matérias-primas ou para controle de umidade. Nessas situações, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível auxiliar, substituindo derivados fósseis em sistemas de secagem térmica ou em queimadores de ajuste térmico em moinhos verticais de rolos. Essa substituição também contribui para a mitigação das emissões diretas oriundas do uso de combustíveis convencionais.

No que se refere à logística, o transporte do clínquer e dos aditivos até a unidade de moagem representa uma fonte expressiva de emissões de CO₂. A implementação de uma logística sustentável baseada em hidrogênio verde — por meio de caminhões, trens ou navios movidos a hidrogênio ou amônia verde — tem potencial para descarbonizar significativamente o transporte terrestre e marítimo de insumos, sobretudo em trajetos de longa distância.

Por fim, embora a moagem propriamente dita não seja uma fonte direta de emissões de CO₂, o hidrogênio verde pode ter papel relevante em soluções integradas de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS). A produção de hidrogênio por eletrólise, alimentada por fontes renováveis, pode abastecer sistemas de captura de carbono em fornos de clínquer, contribuindo para a compensação das emissões indiretas da moagem. Além disso, o armazenamento de hidrogênio garante o suprimento energético necessário para o funcionamento contínuo desses sistemas, mesmo em períodos de elevada demanda.

Dessa forma, embora a moagem de cimento seja uma etapa com menor intensidade de emissões em comparação à calcinação, a adoção de tecnologias baseadas em hidrogênio verde oferece um potencial significativo de descarbonização indireta, viabilizando uma abordagem sistêmica para a redução das emissões ao longo de toda a cadeia produtiva do cimento.

6.4 Inovações e pesquisas na descarbonização da produção de cimento

Pesquisas estão em andamento para desenvolver processos de calcinação adaptados especificamente ao uso de H₂V, que poderiam operar em condições otimizadas para maximizar a eficiência térmica e minimizar a geração de CO₂ (Pisciotta *et al.*, 2022). Uma abordagem potencial seria a integração de sistemas híbridos, em que o H₂V complementa outras fontes renováveis de calor, como a eletricidade gerada por energia solar.

Outra inovação é o desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) integradas ao processo de calcinação, onde o CO₂ residual gerado na decomposição do CaCO₃ seria capturado antes de ser liberado na atmosfera (IEA, 2021). Assim, o H₂V ajudaria a reduzir as emissões derivadas da queima de combustível, enquanto o CCS trataria das emissões inevitáveis da calcinação.

Quando se combina o uso do hidrogênio verde (H₂V) com a captura e armazenamento de carbono (CCS) na etapa de calcinação, o impacto na redução das emissões de CO₂ pode ser significativamente ampliado. A captura e armazenamento de carbono é capaz de capturar até 90% das emissões de CO₂ produzidas durante o processo

de calcinação, incluindo as emissões inevitáveis que resultam da decomposição química do calcário.

Cálculo do Impacto com H₂V + CCS considerando as seguintes premissas:

- 1. Emissões da produção de cimento:** O setor de cimento é responsável por aproximadamente 7-10% das emissões globais de CO₂.
- 2. Emissões da Calcinação:** A calcinação representa cerca de 60-65% das emissões totais na produção de cimento.
- 3. Redução com H₂V e CCS:**

H₂V: Elimina as emissões relacionadas à queima de combustível, reduzindo aproximadamente 30-40% das emissões da produção de cimento.

CCS: Captura até 90% das emissões restantes, inclusive aquelas geradas pela decomposição do calcário.

Com essa combinação, é possível atingir uma redução total de até 90-95% das emissões de CO₂ associadas ao processo de calcinação. Em termos do impacto geral na construção civil: considerando o cimento como um material-chave na construção civil, a aplicação combinada de H₂V e CCS na calcinação poderia contribuir para uma redução de aproximadamente 6-8% nas emissões globais do setor de construção.

6.5 Estudo de caso - Fábrica de cimento com processo de moagem em São Luís – Maranhão.

Este estudo de caso analisa uma fábrica de cimento localizada em São Luís – MA, cuja característica principal é operar com foco exclusivo na moagem de clínquer importado, sem realizar a etapa de produção do clínquer localmente. Essa peculiaridade torna o caso especialmente relevante para esta pesquisa, pois altera o perfil tradicional de emissões da indústria cimenteira e evidencia a contribuição significativa da logística internacional no total de CO₂ emitido por tonelada de cimento produzido.

O clínquer é importado de diversos países do Mediterrâneo, como Egito, Turquia, Marrocos, Argélia e Grécia, e posteriormente processado com aditivos para a formulação final do cimento. A ausência da etapa de calcinação local reduz diretamente as emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas à decomposição térmica do

calcário, mas transfere parte significativa do impacto ambiental para a logística de transporte internacional. Essa condição torna o caso particularmente relevante para esta pesquisa, ao permitir a análise de um perfil alternativo de emissões e a avaliação de medidas de mitigação com uso do hidrogênio verde.

A fábrica opera de forma contínua, com uma produção anual de aproximadamente 460.000 toneladas de cimento, uma taxa de produção de 70 toneladas por hora e uma taxa de utilização de 95% da capacidade instalada. A energia elétrica utilizada na moagem é fornecida pela distribuidora local Equatorial, complementada por vapor quente gerado a partir de biomassa (cavacos de eucalipto), o que já representa uma estratégia parcial de redução de emissões associadas ao uso de combustíveis fósseis.

Todas as informações aqui apresentadas foram fornecidas diretamente pela equipe técnica da fábrica, no âmbito da coleta de dados primários autorizada para esta pesquisa. Essa colaboração permitiu o levantamento detalhado de aspectos operacionais, quantitativos de produção e composição dos insumos utilizados no processo.

6.5.1 Matérias-primas utilizadas

A produção de cimento na planta analisada baseia-se na formulação de um produto composto, resultante da moagem conjunta de clínquer, gesso, cinzas volantes e materiais pozolânicos. A proporção entre esses componentes segue critérios técnicos previamente estabelecidos pela engenharia da fábrica, com foco no desempenho mecânico, trabalhabilidade e estabilidade do produto final, bem como na viabilidade econômica e ambiental da produção. O Quadro 2 apresenta a composição química usual dos componentes do cimento.

Quadro 2 - Composição química dos principais componentes

Componente	PF (%)	SiO (%)	Al O (%)	Fe O (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO (%)
Gesso	3,89	20,61	11,14	1,28	0,64	39,24	0,44
Clínquer	0,06	1,4	19,7	5,3	63,4	1,9	0,9
Cinza	26,15	17,34	40,56	14,29	12,71	19,26	0,05

Componente	PF (%)	SiO (%)	Al O (%)	Fe O (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO (%)
Gesso	3,89	20,61	11,14	1,28	0,64	39,24	0,44
Argila	16,04	0,06	55,02	17,24	9,05	11,66	0,00

Fonte: Fábrica de cimento em São Luís, MA, 2025.

- **Gesso:** material natural (sulfato de cálcio hidratado), regula o tempo de pega do cimento, evitando o endurecimento rápido.
- **Clínquer:** principal componente, é obtido pela queima de calcário e argila em altas temperaturas; responsável pela resistência, durabilidade e reatividade do cimento.
- **Cinza:** incluem cinzas volantes: **cinza A** (zincal ou zinta A) - proveniente da queima mais eficiente do carvão, resultando em partículas mais finas e reatividade superior. Pode ser adicionada ao cimento sem necessidade de moagem adicional e **cinza B** (zincapê ou zinta B) - produzida a partir da queima ineficiente do carvão, gerando partículas mais grossas e menor reatividade. Possui maior perda ao fogo, limitando sua aplicabilidade no cimento;
- **Argila pozolânica:** é outro componente essencial, rica em alumínio e ferro, que desempenha papel complementar no desenvolvimento das propriedades do cimento. Além de reduzir a demanda por clínquer, a argila contribui para a durabilidade e resistência do produto em ambientes agressivos.

A escolha dessas matérias-primas, segundo informações disponibilizadas pela própria equipe técnica da indústria, tem como premissa equilibrar desempenho técnico, custo de produção e impacto ambiental. A substituição parcial do clínquer por adições minerais, como as pozolanas, já representa uma prática de mitigação de emissões, ainda que limitada frente ao potencial de redução que tecnologias como o hidrogênio verde podem oferecer, conforme discutido nas seções seguintes.

6.5.2 Processo produtivo e qualidade do cimento da planta

A produção de cimento inicia-se com o recebimento e armazenamento das matérias-primas, incluindo clínquer, gesso, cinzas volantes e pozolanas, que são acondicionadas em silos específicos ou pátios de estocagem. Em seguida, realiza-se a

dosagem controlada desses materiais, de acordo com proporções técnicas predefinidas, formando uma mistura homogênea que é encaminhada ao moinho de bolas. Nessa etapa, o material é moído até atingir a granulometria desejada, com o auxílio de separadores dinâmicos que garantem a eficiência do processo. Após a moagem, o cimento é transferido para silos de armazenamento, onde permanece até ser ensacado ou expedido a granel. Na Figura 12, abaixo, temos o esquema da ordem dessas etapas.

Figura 12 - Esquema processo de produção de cimento na unidade moagem São Luís.



Fonte: Autora, 2025.

O processo é monitorado por controle de qualidade contínuo e visa garantir regularidade na composição do produto final e conformidade com as normas técnicas vigentes. O Quadro 3 mostra o resultado das análises de uma amostra analisada em 2023.

Quadro 3 - Análise química do cimento

Data	PF (%)	SiO (%)	Al O (%)	Fe O (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO (%)	Na O (%)	K O (%)
Jan/23	4,30	37,46	7,10	4,66	40,92	1,05	2,70	0,27	0,42

Fonte: Fábrica de cimento em São Luís, MA, 2025.

O cimento analisado apresentou resistência à compressão: 35 MPa (média) e densidade: 1,00 g/cm³ (Dados laboratoriais fornecidos por uma fábrica de cimento localizada em São Luís, MA, 2025).

6.5.3 Quantitativo das emissões de CO no processo de moagem

Embora a fábrica de São Luís não produza clínquer localmente, as emissões oriundas do processo de moagem ainda são relevantes devido ao transporte e processamento do material.

No processo de moagem do clínquer, que envolve a adição de aditivos como gesso e escórias, é também uma etapa crucial na produção de cimento, responsável por uma significativa emissão de CO . Essa emissão provém de várias fontes, que vão desde o consumo de energia até o transporte dos insumos.

Foram consideradas como principais fontes de emissão de CO no processo produtivo: a produção e o transporte do clínquer, o uso de aditivos e demais insumos, o consumo de energia elétrica ao longo da moagem e a geração de vapor utilizada na secagem dos materiais. As estimativas baseiam-se em cálculos por tonelada de cimento produzido, utilizando os parâmetros apresentados na Figura 13:

Figura 13 - Fatores de emissão de CO₂ na produção de cimento, por tonelada



Fonte: Adaptado pela autora, 2025.

Fator de emissão da produção de clínquer: 0,894 tCO /t;

Fator de emissão do transporte marítimo internacional de clínquer (estimado):
0,058 tCO /t;

Fator de emissão médio da energia elétrica da Equatorial Maranhão: 0,100
tCO /MWh;

Fator de emissão da biomassa (cavaco de eucalipto): considerado neutro,
conforme metodologia do IPCC (2022);

Consumo energético médio por tonelada de cimento: 90 kWh elétricos e 0,05 t de vapor.

A moagem mecânica do cimento demanda uma quantidade significativa de energia, fornecida por moinhos de bolas ou de rolos. Na planta estudada, são consumidos aproximadamente 40,0 kWh de energia elétrica por tonelada de cimento produzido, proveniente da rede da distribuidora local Equatorial. Além disso, é utilizada biomassa (cavacos de eucalipto) para geração de vapor quente, com o objetivo de reduzir a umidade da matéria-prima antes da moagem. Durante esse processo, a exposição do material a calor residual ou umidade pode desencadear reações secundárias, como hidratação ou decomposição térmica, liberando quantidades pontuais de dióxido de carbono (CO₂). Também devem ser consideradas as emissões indiretas associadas à produção dos aditivos utilizados na composição do cimento, como gesso, escória de alto-forno e cinzas volantes, cuja fabricação frequentemente depende de energia proveniente de fontes fósseis. Somam-se a isso ineficiências operacionais, como desgaste de equipamentos, regulagem inadequada dos moinhos ou parâmetros de operação não otimizados, os quais aumentam o consumo energético, amplificando as emissões de CO₂, especialmente em contextos de redes elétricas com participação significativa de termelétricas.

Foram feitos os cálculos de emissões de CO₂ na etapa de moagem com base nas contribuições descritas e nos dados fornecidos pela fábrica, ou seja:

A planta consome 40 kWh por tonelada de cimento moído;

A energia elétrica utilizada apresenta um fator de emissão de 0,100 tCO₂ /MWh;

O clínquer percorre cerca de 20 km em transporte rodoviário do Porto do Itaqui até a planta, o que contribui com emissões adicionais;

O transporte marítimo internacional do clínquer também tem um impacto expressivo, com fator estimado de emissão de 0,01 kgCO₂ por tonelada transportada por quilômetro.

Segue-se o cálculo de emissões CO₂ na moagem de cimento:

- **Consumo de Energia Elétrica:**

Dado: 40 kWh/tonelada (fornecido pela Equatorial).

Fator de emissão: 0,1 kg CO /kWh (média do Brasil, devido à matriz hidrelétrica).

Emissões: $40 \text{ kWh/ton} \times 0,1 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 4 \text{ kg CO}_2/\text{ton}$.

- **Transporte de Insumos:**

Transporte marítimo (Países do Mediterrâneo até o Porto de Itaqui)

Distância: 6500 km/ton (média)

Fator de emissão: 0,01 kg CO /ton-km

Emissões: $6500 \text{ km} \times 0,01 \text{ kg CO}_2/\text{ton-km} = 65 \text{ kg CO}_2/\text{ton}$.

*médias que pode variar conforme o tipo de navio, condições de navegação e eficiência operacional.

Transporte rodoviário (Porto até a fábrica em caminhões a diesel).

Distância: 20 km/ton

Fator de emissão: 0,15 kg CO /ton-km (diesel).

Emissões: $20 \text{ km} \times 0,15 \text{ kg CO}_2/\text{ton-km} = 3 \text{ kg CO}_2/\text{ton}$.

- **Emissões Residuais do Clínquer**

Contribuição: Embora o clínquer seja importado, sua produção emite CO .

Fator de emissão: 10 kg CO /ton (valor conservador, considerando processos de importação e manuseio).

- **Aditivos (Gesso e Pozolânicos)**

Contribuição: Processamento de materiais como gesso e cinzas.

Fator de emissão: 10 kg CO /ton (baseado em dados de processamento industrial).

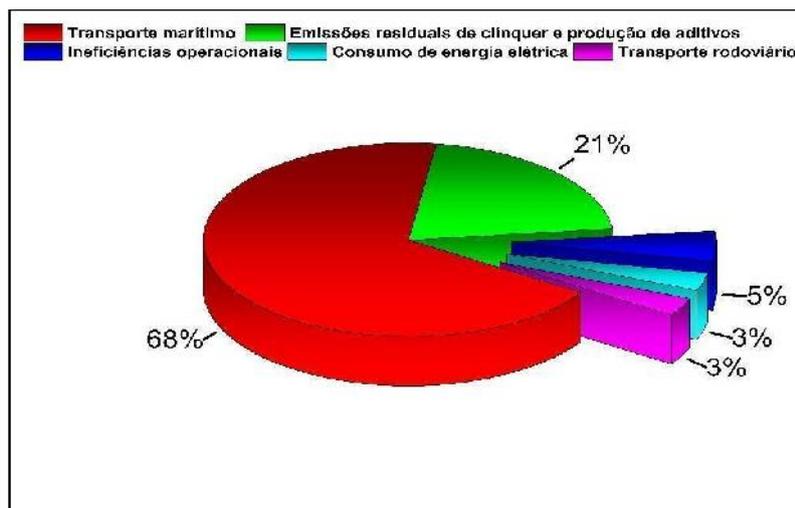
- **Ineficiências Operacionais**

Contribuição: Perdas energéticas e falhas de processo.

Fator de emissão: 5 kg CO /ton (estimativa padrão para operações não otimizadas).

Somatório total das emissões: A Figura 14 ilustra essas emissões, em participação percentual de CO , associadas ao processo de moagem na fábrica de São Luís.

Figura 14 - Fontes de emissão de CO na moagem de cimento na fábrica de São Luís



Fonte: Organizado pela Autora, 2025.

Até completar a etapa de moagem, são emitidos aproximadamente 97 kg de CO por tonelada de cimento produzida.

A análise das fontes emissoras na planta analisada revela um perfil singular, com predominância das emissões relacionadas à logística internacional. O transporte marítimo do clínquer, que percorre aproximadamente 6.500 km até o Porto do Itaqui, é responsável por 68% das emissões totais de CO por tonelada de cimento. Esse impacto decorre do fator de emissão médio do transporte naval (0,01 kg CO /ton·km), que, embora relativamente baixo, torna-se expressivo devido à longa distância percorrida. Na sequência, as emissões residuais vinculadas ao próprio clínquer e à produção dos aditivos representam 21% do total. Tais emissões incluem, por um lado, o CO remanescente do processo de calcinação do clínquer — não realizado localmente, mas herdado do processo original — e, por outro, as emissões indiretas dos aditivos, como o gesso e os materiais pozolânicos, cuja produção frequentemente demanda energia de origem fóssil.

Além desses fatores estruturais, aspectos operacionais também contribuem para o perfil de emissões da planta. Ineficiências energéticas, como desgaste de moinhos ou ajustes subótimos de processo, respondem por cerca de 5% das emissões. O consumo de energia elétrica, por sua vez, representa apenas 3%, um valor relativamente baixo em função da matriz elétrica brasileira predominantemente renovável (fator de emissão de 0,1 kg CO /kWh). Já o transporte rodoviário, referente ao deslocamento de cerca de 20

km entre o Porto do Itaqui e a planta, também contribui com 3%, sustentado principalmente pelo uso de veículos movidos a diesel.

O total estimado de 97 kg CO₂ por tonelada de cimento, embora 23% inferior à média global para plantas de moagem (126 kg CO₂ /t), ainda está acima de benchmarks europeus (70 kg CO₂ /t), que se beneficiam de sistemas logísticos mais eficientes e maior penetração de energia renovável (CSI, 2022). Embora a planta analisada não produza clínquer — etapa que, em fábricas integradas, pode gerar até 900 kg de CO₂ por tonelada — suas emissões ainda chegam a 97 kg por tonelada apenas com moagem e logística. Isso demonstra que, mesmo sem a principal fonte de carbono do processo convencional, o impacto ambiental segue elevado, principalmente por causa do transporte marítimo.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem integrada para a descarbonização, que envolva não apenas a otimização logística e melhorias operacionais, mas também a adoção de fontes energéticas mais limpas. A fábrica já implementa estratégias sustentáveis, como o uso de biomassa (cavacos de eucalipto e bambu) no gerador de gás quente (GGQ) e a incorporação de pozolanas e cinzas volantes para reduzir o teor de clínquer no cimento. Entretanto, a introdução do hidrogênio verde surge como uma alternativa promissora para ampliar os ganhos ambientais. O H₂ pode substituir combustíveis fósseis em diversas etapas do processo produtivo, especialmente no aquecimento e na geração de energia térmica, contribuindo para a redução expressiva das emissões de CO₂. Essa possibilidade será avaliada na seção a seguir.

6.5.6 Avaliação da substituição do hidrogênio convencional ou inserção do hidrogênio verde na redução das emissões de CO₂

Considerando as fontes de emissão identificadas no processo de moagem de cimento, esta seção apresenta uma simulação do potencial de mitigação por meio da substituição de combustíveis fósseis e eletricidade convencional por hidrogênio verde (H₂). Os dados foram estimados com base em valores médios operacionais e em cenários otimizados de adoção tecnológica, conforme detalhado a seguir:

- **Transporte Marítimo de Clínquer** - emissão está associada ao uso de combustíveis (óleo bunk) em navios. Potencial com H₂ - Navios movidos a

hidrogênio verde ou combustíveis derivados (ex.: amônia verde) reduzem emissões em 85-95%.

Emissão atual: 65 kg CO /ton

Emissão com H V (ex.: amônia verde): 6,5 kg CO /ton

Redução líquida: 58,5 kg CO /ton

Redução percentual: 90%

- **Produção de Aditivos e Clínquer** (10 kg CO /ton cada), a fabricação de gesso, pozolânicos e clínquer utiliza energia fóssil, gerando emissões indiretas. Potencial com H V - Substituição de combustíveis fósseis por H V em fornos industriais e processos químicos reduz emissões em 70%.

Emissão atual: 20 kg CO /ton (10 + 10)

Emissão com H V: 6 kg CO /ton

Redução líquida: 14 kg CO /ton

Redução percentual: 70%

- **Consumo de Energia Elétrica** (4 kg CO /ton), a fábrica utiliza energia da rede 0,1 kg CO /kWh. Potencial com H V - Gerar eletricidade via células a combustível de H V reduz o fator de emissão para 0,01 kg CO /kWh (apenas emissões residuais).

Emissão atual: 4 kg CO /ton

Emissão com H V (via célula a combustível): 0,4 kg CO /ton

Redução líquida: 3,6 kg CO /ton

Redução percentual: 90%.

- **Transporte Rodoviário** (3 kg CO /ton), os caminhões a diesel emitem 3 kg CO /ton no trajeto porto-fábrica. Potencial com H V - Caminhões movidos a hidrogênio verde eliminam emissões diretas.

Emissão atual: 3 kg CO /ton

Emissão com H V: 0 kg CO /ton

Redução líquida: 3 kg CO /ton

Redução percentual: 100%

- **Ineficiências Operacionais** (5 kg CO /ton), perdas energéticas aumentam o consumo de eletricidade e combustíveis. Potencial com H V - Sistemas de controle automatizados alimentados por H V reduzem desperdícios em 50%.

Emissão atual: 5 kg CO /ton

Emissão com automação alimentada por H V: 2,5 kg CO /ton

Redução líquida: 2,5 kg CO /ton

Redução percentual: 50%

A substituição do hidrogênio convencional pelo H V reduziria as emissões totais de 97 kg CO /ton para 15,4 kg CO /ton, uma queda de 84%. Os maiores ganhos ocorreriam no transporte marítimo (-90%) e na geração de energia (-90%), alinhando-se às metas globais de descarbonização do setor cimenteiro, como apresentado no Quadro 4:

Quadro 4 - Comparativo das emissões CO₂ no processo atual da empresa emissão estimada com uso de H₂V nas diferentes fontes.

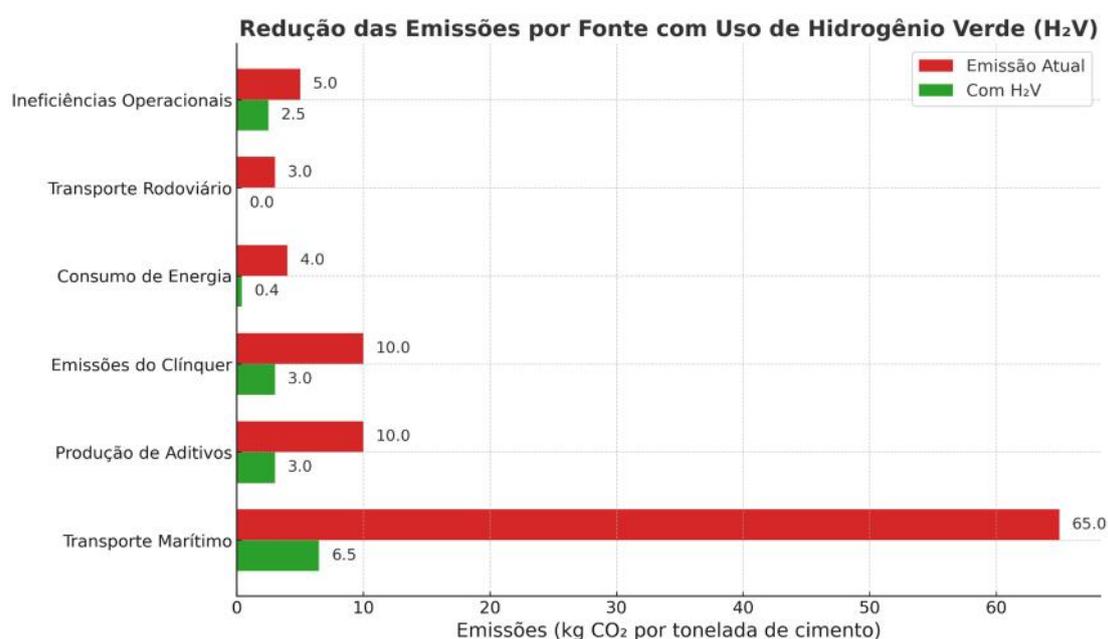
Fonte de Emissão	Emissão Atual (kg CO /ton)	Emissão estimada com H V (kg CO /ton)	Redução (%)
Transporte Marítimo	65	6,5	90%
Produção de Aditivos	10	3	70%
Emissões do Clínquer	10	3	70%
Consumo de Energia	4	0,4	90%
Transporte Rodoviário	3	0	100%
Ineficiências Operacionais	5	2,5	50%
Total	97	15,4	84%

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 15 apresenta uma comparação visual entre as emissões atuais e as emissões estimadas com a substituição por hidrogênio verde (H V) em cada uma das

principais fontes da etapa de moagem de cimento. Observa-se que a maior contribuição absoluta para a mitigação provém do transporte marítimo do clínquer, seguido pelas emissões associadas à produção de aditivos e clínquer. A redução é significativa também no consumo de energia elétrica e no transporte rodoviário, refletindo o potencial técnico de descarbonização da cadeia logística e operacional. A visualização reforça a viabilidade da transição para o H V, evidenciando ganhos relevantes em termos de emissões evitadas por tonelada de cimento produzido.

Figura 15 – Comparativo das emissões atuais x emissões com H₂V com redução



Fonte: Autora, 2025.

A produção local de clínquer no Maranhão, associada à geração de hidrogênio verde (H V) a partir de fontes renováveis, representa uma solução estratégica de alta viabilidade técnica e ambiental para a descarbonização da indústria cimenteira. Atualmente, o transporte marítimo de clínquer importado responde por aproximadamente 68% das emissões totais de CO da fábrica de São Luís (65 kg CO /ton), além de gerar custos logísticos elevados e instabilidade de preços.

Com recursos solares de 5,8 kWh/m²/dia e ventos médios acima de 8 m/s na região litorânea, o Maranhão possui uma das melhores combinações de potencial eólico e solar do Brasil, segundo dados da SEINC. Isso viabiliza a instalação de usinas híbridas e eletrolisadores próximos às fontes de geração, permitindo a produção local de H V a

custos competitivos — entre US\$ 1,5 e US\$ 2,5/kg até 2030, de acordo com a IRENA. Essa integração pode reduzir o custo da eletricidade para níveis de US\$ 20–30/MWh, condição essencial para produção industrial de hidrogênio.

A substituição de combustíveis fósseis por H V no processo de calcinação permitiria reduzir as emissões diretas da etapa de queima de 900 para 90 kg CO /ton de clínquer, uma queda de 90%. Além disso, a geração energética renovável eliminaria as emissões indiretas da eletricidade (4 kg CO /ton) e o transporte marítimo seria completamente suprimido, com impacto direto na pegada de carbono e nos custos logísticos, que hoje variam entre US\$ 50 e US\$ 100/tonelada de clínquer importado.

A estratégia pode ser potencializada com a valorização da bioeconomia regional. Resíduos agrícolas, como cavacos de eucalipto, podem ser utilizados como biomassa complementar, reduzindo a demanda direta por H V nos fornos. Além disso, o uso de argila calcinada disponível no estado como substituto parcial do clínquer oferece uma alternativa viável para reduzir ainda mais as emissões sem comprometer o desempenho do cimento. Segue no Quadro 5 o impacto projetado nas categorias que evidenciam no estudo de caso.

Quadro 5 – Impacto projetado com clínquer local e hidrogênio verde

Categoria	Emissão atual (kg CO /ton)	Emissão com clínquer local + H₂V	Redução
Transporte marítimo	65	0	100%
Produção de clínquer	900*	90	90%
Energia elétrica	4	0	100%
Total	969	90	91%

*Valor hipotético se o clínquer fosse produzido localmente com combustíveis fósseis.

Os dados apresentados demonstram que a produção local com uso de hidrogênio verde (H V) permitiria reduzir as emissões da planta de São Luís em mais de 90%, colocando o Maranhão na vanguarda da transição para uma indústria cimenteira de baixo carbono. O estado reúne condições ímpares para se consolidar como um hub nacional de cimento verde, combinando infraestrutura portuária estratégica — como o

Porto do Itaqui — com abundância de recursos renováveis e sinergia com projetos de H V já em fase de planejamento.

As estratégias para viabilizar essa transição incluem a implementação de incentivos fiscais, como a isenção de ICMS para eletrolisadores e equipamentos voltados à geração de energia limpa. Também são relevantes os projetos de parcerias público-privadas, como pilotos com a Aço Verde Brasil, o aproveitamento das usinas eólicas do Parque Delta 3 no Maranhão e a adaptação do Porto do Itaqui para exportação de cimento e aço, criando um ambiente favorável para atração de investimentos globais.

A produção local de clínquer, aliada ao H V gerado com energia renovável, não apenas reduziria as emissões da fábrica de São Luís em 91% — conforme indicado na Figura 11 —, mas também posicionaria o estado como referência global em cimento verde. Com projeções de redução do custo do H V para US\$ 1,5/kg até 2030 e uma matriz elétrica 100% renovável, o Maranhão está preparado para liderar a transição para uma indústria cimenteira carbono negativa, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e ao Acordo de Paris. A chave está em articular recursos locais, tecnologia acessível e políticas audaciosas — configurando um modelo replicável para outras regiões do Nordeste e do mundo.

6.6 Considerações sobre os desafios e limitações para o uso de H₂V nas indústrias do aço e cimento

Os achados apresentados nesta dissertação reforçam a importância estratégica do hidrogênio verde como instrumento fundamental na descarbonização de setores industriais intensivos em emissões de dióxido de carbono, com destaque para as indústrias de aço e cimento. A análise desenvolvida ao longo dos resultados permite afirmar que a substituição das atuais rotas energéticas baseadas em combustíveis fósseis por soluções sustentadas no uso de H V configura-se como uma das medidas mais eficazes para a mitigação de gases de efeito estufa no setor da construção civil.

No âmbito da siderurgia, a substituição do carvão coque pelo hidrogênio verde no processo de redução direta do minério de ferro pode resultar em uma diminuição de até 95% das emissões de CO₂, conforme evidenciado no quadro 1 e na figura 7. Essa transformação, além de ambientalmente vantajosa, já demonstra viabilidade técnica por

meio de iniciativas internacionais, como os projetos HYBRIT, na Suécia, e SALCOS, na Alemanha. No Brasil, experiências como a da Aço Verde Brasil, sediada no Maranhão, apontam para um ambiente favorável à produção de aço com baixa pegada de carbono, sustentado por condições estruturais, logísticas e energéticas adequadas, o que amplia as possibilidades de incorporação do H V nos próximos ciclos produtivos.

No setor cimenteiro, os dados do estudo de caso revelam que o uso do H V pode reduzir em até 60% as emissões da etapa de moagem de cimento, ao substituir eletricidade de origem fóssil e combustíveis no transporte. Na etapa de calcinação — responsável por aproximadamente 900 kg CO /ton de clínquer — a substituição do combustível fóssil por H V pode reduzir em até 50% as emissões diretas, eliminando aquelas relacionadas à queima, embora sem impactar as emissões de origem química do calcário. Como mostrado no Quadro 6, a redução total projetada por tonelada de cimento chega a 39,5%, quando combinadas as soluções para moagem e calcinação.

Quadro 6 - Comparativo das emissões de CO por tonelada de cimento: cenário atual x cenário com hidrogênio verde

Etapa de processo	Cenário atual (kg CO /ton)	Com H₂V (kg CO /ton)	Redução (%)
Moagem	75	30	-60%
Calcinação	900	450	-50%
Total estimado	975	590	-39,5%

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do estudo de caso.

Tais evidências demonstram que o hidrogênio verde transcende o status de mera promessa tecnológica, configurando-se como uma solução realista e eficaz, com impactos mensuráveis sobre a redução das emissões setoriais. A produção descentralizada de H V a partir de fontes solares e eólicas, aliada à instalação de eletrolisadores próximos às unidades industriais, pode integrar cadeias produtivas locais, reduzindo a dependência de insumos importados e fortalecendo a economia regional.

Contudo, para consolidar essa realidade, alguns desafios e limitações precisam ser enfrentados. Sendo os principais:

1. Custo e disponibilidade do H V - Atualmente, o H V ainda apresenta custos elevados (US\$ 3–5/kg), comparados ao hidrogênio cinza (US\$ 1–2/kg), e sua produção em larga escala é limitada. Entretanto, as crescentes pressões climáticas, associadas a incentivos internacionais e escalabilidade tecnológica, tendem a acelerar sua competitividade. A previsão da IRENA é de que o custo caia para US\$ 1,5–2,5/kg até 2030.

2. Adaptação de fornos industriais - A aplicação de H V na calcinação requer ajustes técnicos nos queimadores, controle de temperatura e segurança, uma vez que a chama de hidrogênio é mais quente e reativa. Esses investimentos iniciais, no entanto, seguem a lógica de evolução de tecnologias disruptivas, como ocorreu com veículos elétricos e turbinas eólicas.

3. Emissões irreversíveis da reação química - Mesmo com o uso de H V, a reação química do calcário continua liberando CO₂. Para descarbonizar completamente a produção de clínquer, será necessário integrar tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) — uma frente em crescimento e com forte demanda internacional.

4. Integração com outras soluções sustentáveis - O uso do H V deve ser parte de uma abordagem mais ampla, que envolva eletrificação com fontes renováveis, eficiência energética, logística de baixo carbono e o uso de materiais alternativos, como pozolanas locais e biomassa.

Diante disso, a análise integrada das seções precedentes confirma que o hidrogênio verde não deve ser compreendido apenas como uma alternativa viável, mas como um vetor indispensável à concretização das metas de neutralidade climática nos setores de cimento e aço. No contexto brasileiro e particularmente no estado do Maranhão, a disponibilidade abundante de fontes renováveis, somada à presença de infraestrutura portuária estratégica e de polos industriais relevantes, oferece vantagens comparativas significativas para o fortalecimento de uma economia de baixo carbono ancorada no uso do H V.

7 CONCLUSÃO

A presente dissertação demonstrou, com base em revisão técnica e estudo de caso aplicado, que o hidrogênio verde (H V) representa mais que uma alternativa viável: trata-se de um vetor estratégico, realista e eficaz para a descarbonização das indústrias do aço e cimento. Embora a transição energética global enfrente desafios técnicos e econômicos, o estado do Maranhão desponta como uma exceção promissora. Com seu elevado potencial solar (5,8 kWh/m²/dia), recursos eólicos de alta qualidade, biomassa abundante e infraestrutura portuária estratégica (Porto do Itaqui), a região reúne os elementos necessários para viabilizar a produção de H V a custos estimados entre US\$ 1,5 e 2,5/kg até 2030, tornando a industrialização verde uma realidade prática e competitiva.

No estudo de caso realizado em São Luís, verificou-se que as emissões totais da cadeia produtiva de cimento giram em torno de 969 kg de CO₂ por tonelada, com destaque para os 900 kg emitidos na etapa de calcinação. A adoção de H V e eletrificação limpa poderia reduzir esse valor para cerca de 90 kg de CO₂/tonelada, eliminando mais de 90% das emissões. Este não é apenas um case ilustrativo, mas sim um protótipo funcional de um novo modelo industrial. Um modelo que não apenas diminui a pegada ambiental, mas que reduz custos logísticos (até US\$ 100/tonelada de clínquer importado) e ainda viabiliza ganhos econômicos com créditos de carbono estimados entre US\$ 30 a 60 por tonelada evitada. O Maranhão tem, portanto, as credenciais para se tornar um hub de descarbonização, abastecendo o Brasil e o mundo com insumos e tecnologias para uma construção civil de baixo carbono.

Diante dessas constatações, futuros trabalhos poderão aprofundar o potencial de ganhos econômicos oriundos da venda de produtos de baixo carbono e dos créditos de carbono gerados. Também se recomenda a expansão do estudo para outras etapas da cadeia produtiva da construção civil, como o transporte urbano de materiais, a fabricação de concreto e o reaproveitamento de resíduos industriais com uso de H V. Estudos técnicos sobre a adaptação de queimadores e a integração energética com microrredes renováveis locais também se mostram promissores. Por fim, há espaço significativo para o desenvolvimento de modelos preditivos, com uso de inteligência artificial, que projetem cenários regionais de custo-benefício para implantação de plantas industriais verdes no estado.

Este trabalho é um convite à ação. Os dados, análises e simulações aqui apresentados revelam uma janela de oportunidade rara e estratégica para que o Maranhão seja protagonista na descarbonização da indústria no Brasil e inspire outras regiões a seguirem o mesmo caminho. O cenário mostra-se realizável, mensurável e replicável. Se aproveitarmos agora os recursos locais, as rotas tecnológicas disponíveis e a força das políticas públicas certas, estaremos diante não apenas de uma mudança industrial, mas global.

8 CONTRIBUIÇÕES ATRELADAS A DISSERTAÇÃO

8.1 Importância social

A construção civil é uma das atividades econômicas de maior impacto ambiental, devido ao alto consumo de recursos naturais, geração de resíduos e emissões de gases de efeito estufa (GEE). No contexto atual de mudanças climáticas e da crescente preocupação global com a sustentabilidade, buscando soluções que reduzam a pegada ambiental deste setor torna-se não apenas uma prioridade técnica e econômica, mas como necessidade social, capaz de gerar impactos positivos amplos e transformados.

A descarbonização na construção civil representa um marco para a sociedade, pois reflete o compromisso com a preservação ambiental e com o bem-estar das futuras gerações. A integração do (H V) como alternativa energética é uma solução inovadora que contribui significativamente para a mitigação dos impactos ambientais do setor. O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, eletrólise da água, energia solar ou eólica, é uma alternativa limpa e sustentável aos combustíveis fósseis, reduzindo as emissões de carbono.

8.2 Importância econômica

A descarbonização da construção civil, especialmente por meio do uso do (H V), representa uma oportunidade estratégica para alavancar ganhos econômicos em um dos setores mais relevantes da economia global. Além de responder às demandas urgentes de mitigação climática, eficiência energética e redução de custos, gerando ganhos econômicos e competitividade para empresas, governos e sociedade.

A implementação do H₂V permite a redução da dependência de fontes de energia tradicionais e poluentes, o que resulta em menores custos operacionais e uma gestão mais eficiente dos recursos. Além disso, ao adotar soluções sustentáveis, o setor da construção civil se torna mais competitivo, não apenas no mercado local, mas também no internacional, onde práticas de baixo carbono estão se tornando requisitos essenciais.

Embora a adoção inicial de H₂V e de tecnologias associadas exija investimentos consideráveis, sua utilização pode resultar numa expressiva redução de custos operacionais ao longo do ciclo de vida das obras.

8.3 Importância ambiental

A construção civil contribui para as emissões de GEE, tanto pela produção de materiais, como o cimento e o aço, quanto pelo uso de combustíveis fósseis em maquinários e processos construtivos. A substituição dessas fontes de energia por H₂V produzida a partir da eletrólise da água utilizando energias renováveis, elimina a emissão de carbono no processo de combustão. Essa mudança tem o potencial de reduzir significativamente a pegada de carbono do setor, alinhando-o às metas globais de mitigação climática, como as que estão previstas no Acordo de Paris.

Assim, diminuindo a dependência dos combustíveis fósseis, o uso do H₂V contribui para uma transição energética mais justa e sustentável, reforçando o compromisso do setor com a neutralidade de carbono e consolidando sua participação em uma economia global de baixo carbono. Isso não apenas reduz os impactos climáticos, como estimula a adoção de tecnologias inovadoras que podem ser replicadas em outros segmentos.

REFERÊNCIAS

ABRAINCO (Brasil). **PIB da Construção tem alta de 6,9% em 2022 e puxa crescimento da economia.** 2 mar. 2023. Disponível em: <https://www.abrainco.org.br/construcao-civil/2023/03/02/pib-da-construcao-tem-alta-de-69-em-2022-e-puxa-crescimento-da-economia>. Acesso em: 8 jun. 2023.

BARBOSA, A. P. *et al.* **Sustentabilidade na construção civil: uma análise da emissão de CO₂.** In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2003, Niterói. Anais [...]. Niterói: UFF, 2003.

BERC, J. **Carbon emissions from the construction industry in developing countries: The case of China.** Journal of Environmental Management, 2021.

BEZERRA, FD. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia.** Caderno Setorial Etene, 6. ed. Fortaleza: BNB, 2021. 13h. (212). Disponível em: <https://cultura.bnb.gov.br/s482d/manipular/123456/1109>.

BROWN, L. (Ed.). **Building a sustainable society.** Washington: Worldwatch Institute, 1981.

BROWN, Theodore L *et al.* **Eletroquímica.** In: BROWN, Theodore L *et al.* **Química: A ciência central.** 9. ed. New York: Pearson Prentice Hall, 2005. Cap. 20. p. 754-756.

CASTRO, N. *et al.* **A economia do hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil.** E-papers Serviços Editoriais. 2023.

CE DELFT. **Sufficiency in building design and construction: Drivers and barriers.** Delft: CE Delft, 2020. Disponível em: <https://cedelft.eu/publications>. Acesso em: 30 mar. 2024.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Missão.** [S.l.]: CBCS, 2014. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/institucional/show.asp?ppgCode=BCCF20BC-8628-4D3D-83ED-FBA37CFA560D>. Acesso em: 28 mar. 2023.

CORBIN, J.; STRAUSS, A. **Basics of Qualitative Research: Grounded Theory Procedures and Techniques.** Newbury Park: Sage Publications, 1990.

COSTA, Bruno. **Quantificação das emissões de CO geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil. 2012.** 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CSI. **Desempenho energético e de CO da indústria de cimento: acertando os números (GNR).** 2022.

DEMANBORO, A. C. *et al.* **O impacto ambiental da construção civil.** Revista de Engenharia Civil, v. 23, n. 2, p. 33–41, 2003.

DIVISÃO DE POPULAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.** New York: United Nations, 2018.

EASAC – EUROPEAN ACADEMIES' SCIENCE ADVISORY COUNCIL. **Decarbonisation of buildings: for climate, health and jobs.** EASAC policy report 41, 2021. Disponível em: <https://easac.eu/publications>. Acesso em: 18 mar. 2024.

EISENHARDT, K. M. **Building Theories from Case Study Research.** Academy of Management Review, v. 14, n. 4, p. 532–550, 1989. DOI: 10.5465/amr.1989.4308385.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: [coloque a data de acesso].

FERNANDES, F. R. **Hidrogênio como vetor energético: potencialidades e desafios.** Revista Brasileira de Energia, v. 14, n. 2, p. 87–98, 2008.

FERRAZ, H. **O aço na construção civil.** CDCC USP, núm. 22, out./nov./ dez./ 2003.

FGV – FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa na construção civil brasileira.** São Paulo: FGV, 2011.

FUKUROZAKI, SH. **Avaliação do ciclo de vida de rotas potenciais de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação de biomassa e energia solar fotovoltaica.** 2011. 180f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear

- Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

GCCA – Global Cement and Concrete Association. **Concrete Future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. 2021.** Disponível em: <https://gccassociation.org/concretetfuture/>. Acesso em: 18 abril. 2025.

GECF – GAS EXPORTING COUNTRIES FORUM. **Global Hydrogen Outlook 2050.** Doha: GECF, 2022. Disponível em: <https://www.gecf.org/publications/global-hydrogen-outlook-2050>. Acesso em: 18 abril. 2025.

GERVÁSIO, H. **Life cycle assessment (LCA) of steel structures.** Universidade de Coimbra, 2008.

GLOBAL ABC; IEA; UNEP. **Global Status Report for Buildings and Construction 2020.** Paris: International Energy Agency, 2020. Disponível em: <https://globalabc.org>. Acesso em: 18 abril. 2023.

GIZ – GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. **Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro.** Brasília: GIZ, outubro 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_. Acesso em: 17 jun. 2023.

GURLIT, W. *et al.* **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo.** 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com.br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 13 mai. 2022.

HALDANE, J. B. S. **Daedalus or science and the future: a paper read to the Heretics, Cambridge on February 4th, 1923.** Lowestoft: M. F. Robinson & Co, Ltd, at the Library Press, 1923.

HERMWILLE, L. *et al.* **Um clube do clima para descarbonizar a indústria siderúrgica global.** *Natureza Mudanças Climáticas*, v. 12, p. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-013-9>.

HU, S. **China building energy use and carbon emission yearbook 2021: a roadmap to carbon neutrality.** Springer, 2022. Disponível em: <https://exame.com/esg/cpfl-energia-anuncia-projeto-de-hidrogenio-verde-em-fabrica-da-mizu-cimentos-no-rn/>. Acesso em: 12 mar. 2024.

IABr – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2021.** Brasília: Instituto Aço Brasil, 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br>. Acesso em: 18 abril. 2023.

IBRAM (Brasil). **Em 2050, consumo mundial de aço será em 3 bilhões de toneladas ao ano.** 28 jun. 2022. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/em-2050-consumo-mundial-de-aco-sera-em-3-bilhoes-de-toneladas-ao-ano/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

IEA; PNUMA. **Relatório de status global para edifícios e construção: rumo a um setor de edifícios e construção com emissões zero, eficiente e resiliente.** 2019.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells.** Paris: IEA, 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>. Acesso em: 18 abril. 2023.

IEA. **Energy technology perspectives 2020.** 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/ab43a9a5-em>.

IEA. **The future of hydrogen.** 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

IEA. International Energy Agency. **Cement – Analysis.** 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acesso em: 18 abril. 2023.

IEA. **Iron and steel.** 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>. Acesso em: 17 jun. 2023.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Texto para discussão**. Brasília; Rio de Janeiro: Ipea, 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2022 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2022rf/index.html>. Acesso em: 18 abril. 2023.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Low-cost finance for the energy transition**. 2022a. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/May/Low-cost-finance-for-the-energy-transition>. Acesso em: 16 jun. 2023.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Desenvolvimento sustentável na produção de cimento**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 4, n. 1, p. 27–38, jan./mar. 2004.

JOHN, V. M. **Reciclagem, coprocessamento e ciclo de vida: o futuro dos resíduos na indústria do cimento**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 4, p. 311–316, out./dez. 2005.

JUANGSA FB, CEZELIANO S, DARMANTO PS e AZIZ M. **Análise termodinâmica da utilização de hidrogênio como combustível alternativo na produção de cimento**. 2022 42 23–31.

LANARDI, J. S. **Produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis**. *Dissertação (Mestrado em Engenharia)* – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MAPEAMENTO DO SETOR DE HIDROGÊNIO BRASILEIRO. Brasília: **Empresa de Pesquisa Energética – EPE**, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Mapeamento-do-Setor-de-Hidrogenio-Brasileiro>. Acesso em: 18 abril. 2023.

MCTIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. **Quarto Relatório Nacional de Atualização Bienal do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: MCTIC, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes>. Acesso em: 18 abril. 2023.

MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M.; SALDAÑA, J. **Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2015.

ONU. **Acordo de Paris sobre o Clima**. Portal das Nações Unidas Brasil, 11 dez. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>. Acesso em: 17 jun. 2023.

PATTON, M. Q. **Qualitative Research & Evaluation Methods**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2002.

PINHO, F. O. **Quando Construir em Aço?** Revista Engenharia, 2017.
POMPERMAYER, Rafael. **Análise Comparativa Entre Estruturas Metálicas e Estruturas de Concreto Armado**, 2017.

PISCIOTTA M, *et al.* **Estado atual do aquecimento industrial e oportunidades para descarbonização** Prog Energy Combust Sci. 2022

PRESCO. **Energy, environmental and sustainable development: European thematic network on practical recommendations for sustainable construction**, EC 5° Framework Programme. 1999.

REN, J. *et al.* **Deep decarbonization pathways for heavy industry: a review of recent advances and emerging opportunities**. Energy & Environmental Science, v. 15, n. 4, p. 1404–1434, 2022a. DOI: 10.1039/D1EE03476G.

SAHEB, Y. **Decarbonising Buildings: A Global Overview of Buildings Sector Roadmaps**. Paris: OpenEXP, 2021. Disponível em: <https://openexp.eu>. Acesso em: 18 abril. 2023.

SANTOS, C. A.; SANTOS, M. L. **O hidrogênio como fonte alternativa de energia**. Caderno de Energia, v. 3, n. 1, p. 22–30, 2005.

SANTOS, R. V. *et al.* **Descarbonização do setor da construção civil através do uso do hidrogênio verde na produção do aço**. SODEBRAS, v. 19, n. 22, set./dez. 2024.

SERRA, M. **Aquecimento global: evidências e preocupações**. Revista Economia e Tecnologia, Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, v. 9, n. 31 abr. 2007.

SIMÕES, A. F.; HIDALGO, G. E. **A indústria do aço no Brasil: desafios para a descarbonização.** *Revista Conjuntura Econômica*, Rio de Janeiro, v. 75, n. 10, p. 54–60, 2021.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Panorama do setor cimenteiro brasileiro 2019.** Brasília: SNIC, 2019. Disponível em: <https://www.snic.org.br>. Acesso em: 18 abril. 2023.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2022.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/relat2008-9web.pdf>. Acesso em: 5 set. 2024.

SOARES, J. B. **O setor de cimento no Brasil: aspectos energéticos e ambientais.** *Cadernos de Energia*, Rio de Janeiro, n. 38, p. 45–58, 1998.

SOUZA, M.M.V.M. **Hidrogênio e células a combustível.** 1. ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2018.

TOLEDO, R. D. **O cimento e o meio ambiente: impactos e soluções.** In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE CIMENTO E MEIO AMBIENTE, 2004, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABCP, 2004.

UNEP – United Nations Environmental Programme. **Common Carbon Metric for Measuring Energy Use and Reporting Greenhouse Gas Emission from Building Operations. Sustainable Buildings and Climate Initiative, 2012.** Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7922>. Acesso em: 8 ago. 2023.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector.** Nairobi: UNEP, 2020.

UNITED NATIONS. **COP26 Pacto Climático de Glasgow.** Glasgow, 2021. Disponível em: <https://ukcop26.org/wp-content/uploads/2022/05/PORT-COP26-Presidency-Outcomes-TheClimate-Pact.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2023.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. **Cement manufacture and the environment: Part I: Chemistry and technology.** *Journal of Industrial Ecology*, v. 6, n. 1, p. 89–105, 2002.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 17. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

VOGL, V.; ÅMANSSON, K.; NILSSON, L. J. **Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking.** *Journal of Cleaner Production*, v. 203, p. 736–745, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2021.** Brussels: World Steel Association, 2021. Disponível em: <https://worldsteel.org/publications/bookshop/product/world-steel-in-figures-2021/>. Acesso em: 18 abril. 2023.

XI, F. *et al.* **Regional disparity and drivers of building energy use in China.** *Energy Policy*, v. 88, p. 250–259, 2016.

ZHANG, S.; MA, M.; LI, K.; MA, Z.; FENG, W.; CAI, W. **Redução histórica de carbono na operação de edifícios comerciais: China versus Estados Unidos.** *Economia de energia*, 2020a. p. 105712. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105712>.

ANEXO I – Artigo produto do projeto de pesquisa da dissertação

1



Recebido em: 17/06/2024.

Aceito em: 03/08/2024.

Revista SODEBRAS – Volume 19
Nº 222 – SETEMBRO/ DEZEMBRO - 2024

**DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL
ATRAVÉS DO USO DO HIDROGÊNIO VERDE NA
PRODUÇÃO DO AÇO.**

*DECARBONIZATION OF THE CIVIL CONSTRUCTION SECTOR
THROUGH THE USE OF GREEN HYDROGEN IN STEEL
PRODUCTION.*

José Renato de Oliveira Lima¹Marcia Delane Silva²Mayrla Fernandes Farias Medeiro³Ricardson Vieira Dos Santos⁴

Resumo – A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, agravando o aquecimento global. Portanto, é crucial realizar a descarbonização desse setor para alcançar as metas globais de redução dessas emissões. Neste trabalho, estudaremos a descarbonização da construção civil através do uso do hidrogênio verde na produção de aço, um dos materiais mais utilizados nesse setor e responsável por uma grande parte da emissão de dióxido de carbono.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Aço. Construção. Energia

Abstract - The construction industry is one of the main responsible for the emission of greenhouse gases, worsening global warming. Therefore, it is crucial to decarbonize this sector to achieve global targets for reducing these emissions. In this work, we will study the decarbonization of civil construction through the use of green hydrogen in the production of steel, one of the most used materials in this sector and responsible for a large part of carbon dioxide emissions.

Keywords: Green Hydrogen. Steel. Construction. Energy.

¹Doutorado em Química pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Universidade Federal do Maranhão. renato.jose@ufma.br

²Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do Maranhão. marcia.delane@discente.ufma.br

³Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Maranhão. mayrla.ffm@discente.ufma.br

⁴Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Maranhão. ricardson.vieira@discente.ufma.br