

## **HIDROGÊNIO VERDE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: SOLUÇÃO ESTRATÉGICA PARA A DESCARBONIZAÇÃO AMBIENTAL E ECONÔMICA NO MARANHÃO**

**Marcia Delane Silva<sup>1</sup>, José de Renato de Oliveira Lima<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, [marcia.delane@discente.ufma.br](mailto:marcia.delane@discente.ufma.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, [renato.jose@ufma.br](mailto:renato.jose@ufma.br)

**Resumo:** O setor da construção civil é responsável por mais de um terço das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), principalmente devido ao uso intensivo de cimento e aço. Este artigo analisa o uso do hidrogênio verde (H V) como alternativa viável e estratégica para a descarbonização dessa cadeia produtiva, com ênfase na indústria cimenteira do estado do Maranhão. A partir de um estudo de caso em uma planta de moagem localizada em São Luís, foram avaliados os impactos ambientais, econômicos e infraestruturais do uso de H V, simulando cenários de redução de CO<sub>2</sub>, adaptação tecnológica e viabilidade regional. Os resultados indicam que a substituição energética por H V pode reduzir até 91% das emissões totais por tonelada de cimento produzido, com ganhos econômicos projetados por meio de créditos de carbono e menores custos logísticos. Conclui-se que o Maranhão possui condições estratégicas, incluindo infraestrutura portuária, abundância de fontes renováveis e sinergia industrial para se tornar um polo nacional de descarbonização, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

**Palavras-chave:** Hidrogênio verde; Construção civil; Descarbonização; Sustentabilidade; Economia de baixo carbono.

## **GREEN HYDROGEN IN CIVIL CONSTRUCTION: STRATEGIC SOLUTION FOR ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC DECARBONIZATION IN MARANHÃO**

**Marcia Delane Silva<sup>1</sup>, José de Renato de Oliveira Lima<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, [marcia.delane@discente.ufma.br](mailto:marcia.delane@discente.ufma.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, [renato.jose@ufma.br](mailto:renato.jose@ufma.br)

**Abstract:** The construction sector is responsible for more than a third of global greenhouse gas (GHG) emissions, primarily due to the intensive use of cement and steel. This article analyzes the use of green hydrogen (H<sub>2</sub>) as a viable and strategic alternative for decarbonizing this production chain, with an emphasis on the cement industry in the state of Maranhão. Based on a case study of a grinding plant located in São Luís, the environmental, economic, and infrastructural impacts of H<sub>2</sub> use were assessed, simulating scenarios of CO<sub>2</sub> reduction, technological adaptation, and regional viability. The results indicate that energy replacement with H<sub>2</sub> can reduce up to 91% of total emissions per ton of cement produced, with projected economic gains through carbon credits and lower logistics costs. It is concluded that Maranhão possesses strategic conditions, including port infrastructure, abundant renewable sources, and industrial synergy, to become a national decarbonization hub, aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

**Keywords:** Green hydrogen; Civil construction; Decarbonization; Sustainability; Low carbon economy.

## 1.INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas exige a descarbonização urgente de setores altamente emissores, como a construção civil, que contribui com cerca de 37% das emissões globais (IEA, 2020). O hidrogênio verde (H V), obtido por eletrólise da água com uso exclusivo de fontes renováveis, surge como vetor estratégico para substituir combustíveis fósseis e promover uma economia de baixo carbono.

No Brasil, o Maranhão destaca-se como região estratégica pela presença de fontes renováveis abundantes, infraestrutura portuária e potencial para inovação tecnológica na cadeia produtiva da construção civil.

Este artigo tem por objetivo analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da adoção do H V como vetor de descarbonização no setor cimenteiro do Maranhão, com base em dados reais de uma planta industrial localizada em São Luís.

## 2.MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa utiliza abordagem qualitativa e aplicada, fundamentada em três eixos: (a) revisão bibliográfica sobre H V e descarbonização industrial; (b) coleta de dados técnicos em planta cimenteira maranhense; (c) simulações de cenários de substituição energética, com estimativas baseadas no GHG Protocol e no IPCC (2022).

O estudo de caso foi conduzido em uma fábrica de cimento que opera com moagem de clínquer importado. A planta está situada no Polo Industrial de São Luís, próxima ao Porto do Itaqui, com capacidade instalada de 460 mil toneladas por ano.

Foram avaliadas emissões atuais de CO<sub>2</sub>, consumo energético e logístico, bem como projeções com uso de H V como fonte energética e substituição do clínquer importado por produção local renovável.

A planta realiza a moagem de clínquer importado. O processo inclui recepção, dosagem, moagem em moinho de bolas e estocagem do cimento.

### 3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

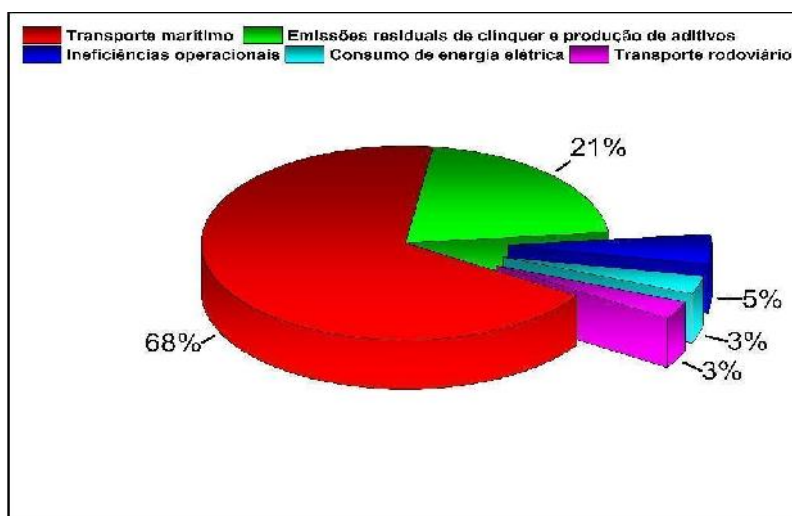
#### 3.1 O cenário atual: emissões intensivas

A planta analisada apresenta emissões totais de aproximadamente 980 kg de CO por tonelada de cimento produzido, das quais 900 kg provêm da calcinação realizada no exterior, associada à produção do clínquer e os demais 80 kg derivam de energia elétrica, transporte marítimo e rodoviário, aditivos e perdas operacionais, com 91% desse total derivando da produção do clínquer no exterior. Essa concentração demonstra a elevada dependência de processos intensivos em carbono e destaca a vulnerabilidade do modelo atual frente às exigências de sustentabilidade e às pressões por regulamentações ambientais mais rígidas.

Esse cenário é compatível com a média global para cimenteiras convencionais, segundo o IPCC (2022), mas está aquém das metas de neutralidade de carbono projetadas para 2050. A continuidade desse modelo tende a representar não apenas riscos ambientais, mas também econômicos, frente à crescente precificação das emissões via mercado de carbono.

A Figura 1 ilustra essas emissões, em participação percentual de CO<sub>2</sub>, associadas ao processo de moagem na fábrica de São Luís.

Figura 1 - Fontes de emissão de CO<sub>2</sub> na moagem de cimento na fábrica de São Luís



Fonte: Organizado pela Autora, 2025.

### 3.2 Cenários com Hidrogênio Verde

Foram simulados dois cenários:

- J Cenário intermediário: Substituição da energia elétrica e transporte por fontes limpas 590 kg CO /t
- J Cenário ideal: Produção local de clínquer com H V e energia renovável emissão total de 90 kg CO /t (redução de 91%)

A análise dos dois cenários propostos: intermediário e ideal, evidencia o expressivo potencial de mitigação do hidrogênio verde (H V). No cenário ideal, com produção local de clínquer e uso integral de H V, a redução atinge 91%, resultando em apenas 90 kg CO /t. Essa redução se aproxima dos níveis de emissões observados em plantas experimentais na Europa e Oriente Médio, onde projetos-piloto de uso de H V já operam com emissões abaixo de 100 kg CO /t.

Além disso, a eliminação do transporte marítimo de clínquer e da energia elétrica de fontes fósseis representa uma vantagem logística estratégica e uma antecipação a possíveis barreiras regulatórias para importações com alto conteúdo de carbono (como o CBAM europeu – *Carbon Border Adjustment Mechanism*).

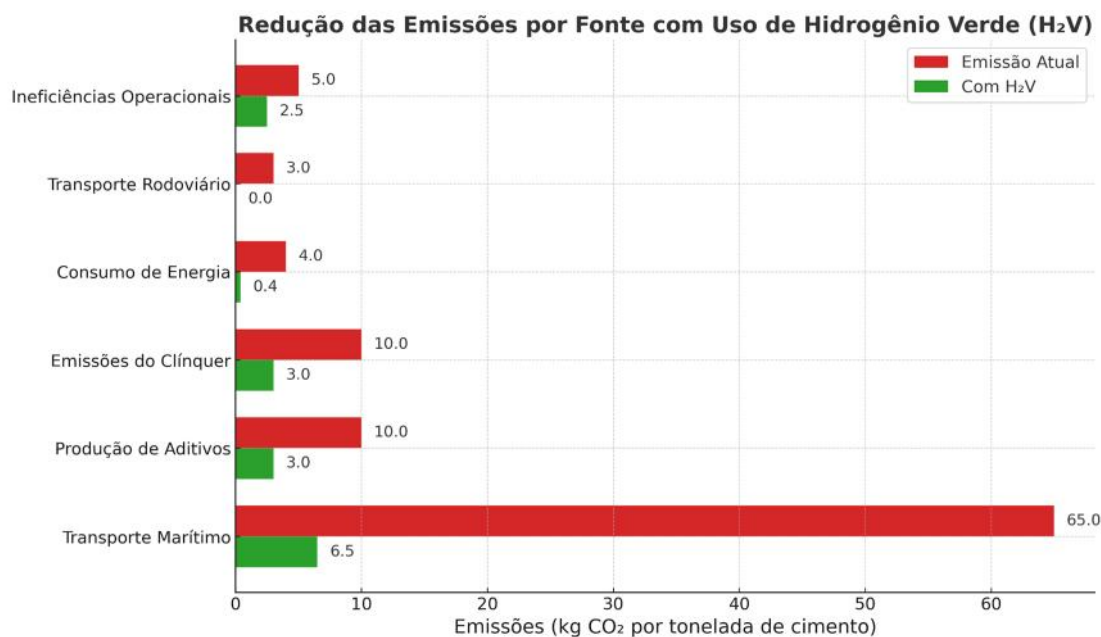
*Tabela 1 - Comparativo das emissões CO<sub>2</sub> no processo atual da empresa com uso de H<sub>2</sub>V nas diferentes fontes.*

Fonte de Emissão	Emissão Atual (kg CO /ton)	Emissão com H V (kg CO /ton)	Redução (%)
Transporte Marítimo	65	6,5	90%
Energia Elétrica	4	0	100%
Transporte Marítimo (clínquer)	65	0	100%
Transporte Rodoviário	3	0	100%
Produção de Aditivos	3	3	–
Perdas Operacionais	5	3	40%
Calcinação (no Exterior)	900	84	91%
<b>Total</b>	<b>980</b>	<b>90</b>	<b>91%</b>

*Fonte: Autora, 2025.*

A Figura 2 destaca a expressiva redução das emissões de CO<sub>2</sub> com o uso de hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), especialmente no transporte marítimo do clínquer, seguido pela produção de aditivos, consumo elétrico e transporte rodoviário, evidenciando o alto potencial de descarbonização da cadeia produtiva do cimento.

Figura 2 – Comparativo das emissões atuais x emissões com H<sub>2</sub>V com redução



Fonte: Autora, 2025.

### 3.3 Viabilidade Econômica - Análise de Custos e Créditos de Carbono

Estudos projetam que o custo do H<sub>2</sub>V poderá alcançar US\$ 1,5 a 2,5/kg até 2030, tornando-se competitivo com o hidrogênio cinza (IEA, 2023). Considerando uma redução de 880 kg CO<sub>2</sub>/t e preço de US\$ 50/t de CO<sub>2</sub> no mercado de carbono, há um potencial de valorização de US\$ 44/t de cimento.

Com uma produção anual de 460 mil toneladas, o ganho bruto com créditos de carbono ultrapassa US\$ 20 milhões/ano, além de economia logística pela eliminação da importação de clínquer.

O estudo revela que, considerando o preço médio do crédito de carbono em US\$ 50/t de CO<sub>2</sub>, a economia anual pode superar US\$ 20 milhões, apenas em créditos. Esse valor não inclui os ganhos indiretos, como redução de taxas alfandegárias, marketing

ambiental e atração de investidores focados em ESG (*Environmental, Social and Governance*). Tais valores colocam o H V não apenas como vetor ambiental, mas como diferencial competitivo e de posicionamento estratégico no mercado.

Comparativamente, enquanto países como Chile e Austrália ainda estão na fase de estruturação de polos de H V, o Maranhão já reúne vantagens simultâneas, localização portuária, potencial renovável e sinergia industrial que o colocam em posição privilegiada.

### **3.4 Vantagens Estratégicas do Maranhão com projeções futuras e Relevância para os ODS**

O estado reúne condições ímpares para se tornar polo de descarbonização:

- J Infraestrutura: Porto do Itaqui como hub logístico para exportação de H V e produtos descarbonizados;
- J Fontes renováveis: Potencial solar e eólico acima da média nacional;
- J Políticas públicas: Comitê Técnico da Indústria de Baixo Carbono instituído em 2023;
- J Sinergia regional: Indústrias de aço (como Aço Verde Brasil) já operam com baixa pegada de carbono.

A adoção do H V na indústria cimenteira maranhense contribuiria diretamente para os ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), 11 (Cidades sustentáveis), 12 (Consumo e produção responsáveis) e 13 (Ação contra a mudança global do clima). O Maranhão pode se tornar um modelo replicável para outras regiões do Brasil e América Latina, demonstrando como a combinação entre matriz energética limpa e política industrial pode redefinir o papel da construção civil na transição verde.

### **3.5 Limitações e Barreiras à Implementação**

Apesar dos benefícios evidentes, a implementação plena do H V enfrenta desafios como:

) Custo atual do H V: ainda elevado, embora em queda progressiva, requer subsídios iniciais ou políticas públicas de fomento;

) Infraestrutura de produção e armazenamento: inexistente no Estado atualmente;

) Capacitação técnica: necessária para operar equipamentos com H V em escala industrial.

Essas limitações exigem políticas articuladas, como parcerias público-privadas, incentivos fiscais e linhas de financiamento específicas para transição energética na indústria.

#### **4.CONCLUSÃO**

A adoção do hidrogênio verde (H V) na cadeia produtiva da construção civil representa uma das estratégias mais promissoras para enfrentar o desafio global da descarbonização industrial. Os resultados apresentados neste estudo, especialmente com base no estudo de caso de uma planta de moagem de cimento em São Luís (MA), demonstram que o uso do H V pode promover uma redução de até 91% nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por tonelada de cimento produzido. Tal redução é possível com a substituição da eletricidade convencional por fontes limpas, a eliminação da dependência do transporte marítimo de clínquer importado, e a utilização de energia renovável na produção local de clínquer.

A transição para o hidrogênio verde (H V) oferece não apenas benefícios ambientais, mas também ganhos econômicos relevantes, com potencial de mais de US\$ 20 milhões anuais, impulsionados por créditos de carbono e economia logística. O Maranhão, com infraestrutura adequada e fontes renováveis abundantes, tem potencial para se tornar referência na transição para uma economia de baixo carbono, alinhada aos ODS e aos princípios ESG.

## 5.REFERÊNCIAS

[1] IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells**. Paris: IEA, 2020.

[2] IEA. **The future of hydrogen**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

[3] IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Sixth Assessment Report**. Geneva: IPCC, 2022.