



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CARLOS ARTHUR SCAPIN JORDÃO COSTA ALBERTO MOREIRA

**PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AÇO NO BRASIL: O PAPEL  
DO AÇO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR  
SIDERÚRGICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GOIÂNIA  
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): CARLOS ARTHUR SCAPIN JORDÃO COSTA ALBERTO MOREIRA

Título do trabalho: PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AÇO NO BRASIL: O PAPEL DO AÇO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR SIDERÚRGICO

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento  SIM  NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Macedo Dias, Professor do Magistério Superior**, em 29/06/2026, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Arthur Scapin Jordão Costa Alberto Moreira, Discente**, em 29/06/2026, às 21:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6280258** e o código CRC **167285D9**.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CARLOS ARTHUR SCAPIN JORDÃO COSTA ALBERTO MOREIRA

**PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AÇO NO BRASIL: O PAPEL  
DO AÇO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR  
SIDERÚRGICO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de  
Conclusão de Curso da graduação em Engenharia  
Química do Instituto de Química da Universidade  
Federal de Goiás.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Rafael Macedo Dias

GOIÂNIA  
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Moreira, Carlos Arthur Scapin Jordão Costa Alberto

PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AÇO NO BRASIL: O PAPEL DO AÇO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR SIDERÚRGICO [manuscrito] / Carlos Arthur Scapin Jordão Costa Alberto Moreira. - 2026.

XLIII, 43 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Rafael Macedo Dias

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Química (IQ), Engenharia Química, Goiânia, 2026.

Inclui: lista de figuras, lista de tabelas.

1. Análise SWOT. 2. Hidrogênio Verde. 3. Descarbonização. 4. Energia Limpa. 5. Sustentabilidade.  
I. Dias, Rafael Macedo, orient. II. Título.

CDU 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e seis dias do mês de junho do ano de 2026 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AÇO NO BRASIL: O PAPEL DO AÇO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR SIDERÚRGICO”, de autoria de CARLOS ARTHUR SCAPIN JORDÃO COSTA ALBERTO MOREIRA, do curso de Engenharia Química, do Instituto de Química da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Rafael Macedo Dias - Orientador (IQ/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos (IQ/UFG) e Prof. Dr. Carlos Alberto Galeano Suarez (IQ/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,0, tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Macedo Dias, Professor do Magistério Superior**, em 26/06/2026, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Galeano Suarez, Professor do Magistério Superior**, em 26/06/2026, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dyrney Araujo Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 26/06/2026, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6280180** e o código CRC **976E8F2F**.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar as principais alternativas tecnológicas para a descarbonização da indústria siderúrgica, com ênfase nas rotas de produção de aço verde e outras rotas sustentáveis e suas perspectivas de aplicação no contexto brasileiro. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica, baseada em artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais nacionais e internacionais, abordando processos consolidados e tecnologias emergentes, como a redução direta do minério de ferro por hidrogênio (HDRI), a eletrólise de óxidos fundidos (MOE), a eletrólise de baixa temperatura (LTE), a utilização de gás natural em rotas híbridas, a reciclagem de sucata metálica, o emprego de carvão vegetal e iniciativas privadas voltadas à redução das emissões de carbono. Complementarmente, foi elaborada uma análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) das principais tecnologias estudadas, permitindo comparar suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças no contexto da descarbonização da siderurgia. Os resultados demonstram que a rota HDRI associada ao forno elétrico a arco apresenta elevado potencial de mitigação das emissões, podendo reduzir em até 95% as emissões de CO<sub>2</sub> quando alimentada por hidrogênio verde e eletricidade renovável, embora ainda enfrente desafios relacionados ao custo do hidrogênio e à disponibilidade de energia limpa. Tecnologias como MOE e LTE apresentam potencial ainda maior de descarbonização, porém permanecem em estágio inicial de desenvolvimento e carecem de validação em escala industrial. Para o cenário brasileiro, a adoção de rotas híbridas com gás natural e hidrogênio verde, associada à reciclagem de sucata e à matriz elétrica renovável, mostra-se uma estratégia viável para descarbonizar a siderurgia nacional, preservando sua competitividade frente às exigências ambientais do mercado internacional. Entretanto, a efetivação dessa estratégia depende do apoio de políticas governamentais capazes de garantir a competitividade do aço brasileiro frente ao mercado internacional.

**Palavras-chave:** análise SWOT; hidrogênio verde; descarbonização; energia limpa; sustentabilidade.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze the main technological alternatives for the decarbonization of the steel industry, with emphasis on green steel production routes and other sustainable technologies, as well as their application prospects in the Brazilian context. To achieve this, a literature review was conducted based on scientific articles, technical reports, and national and international institutional documents, covering both established processes and emerging technologies, such as Hydrogen Direct Reduced Iron (HDRI), Molten Oxide Electrolysis (MOE), Low-Temperature Electrolysis (LTE), hybrid routes using natural gas, steel scrap recycling, the use of charcoal, and private initiatives aimed at reducing carbon emissions. Additionally, a SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) analysis was developed to compare the main technologies studied by evaluating their strengths, weaknesses, opportunities, and threats in the context of steel industry decarbonization. The results indicate that the HDRI route combined with the Electric Arc Furnace (EAF) has a high potential for emissions mitigation, reducing CO<sub>2</sub> emissions by up to 95% when powered by green hydrogen and renewable electricity, although it still faces challenges related to hydrogen costs and the availability of clean energy. Technologies such as MOE and LTE present even greater decarbonization potential; however, they remain at an early stage of development and still require validation on an industrial scale. For the Brazilian scenario, the adoption of hybrid routes based on natural gas and green hydrogen, combined with increased steel scrap recycling and the country's renewable electricity matrix, represents a viable strategy to decarbonize the national steel industry while maintaining its competitiveness in response to international environmental requirements. However, the successful implementation of this strategy depends on government policies capable of ensuring the competitiveness of Brazilian steel in the global market.

**Keywords:** SWOT analysis; green hydrogen; decarbonization; clean energy; sustainability.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xii</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xiii</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>SURGIMENTO DO AÇO</b>	<b>6</b>
<b>4.2</b>	<b>DADOS DE SUSTENTABILIDADE NA SIDERURGIA NO BRASIL</b>	<b>7</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Consumo de matéria-prima</b>	<b>8</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Matriz energética e emissão de CO<sub>2</sub></b>	<b>10</b>
<b>4.3</b>	<b>PROCESSO PRODUTIVO CONVENCIONAL DO AÇO</b>	<b>11</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Matéria-prima</b>	<b>13</b>
<i>4.3.1.1</i>	<i>O minério de ferro</i>	<i>13</i>
<i>4.3.1.2</i>	<i>Preparação das matérias-primas</i>	<i>14</i>
<b>4.3.2</b>	<b>Alto-forno</b>	<b>15</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Aciaria</b>	<b>17</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Forno elétrico a arco (FEA)</b>	<b>19</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Redução direta do minério de ferro (DRI)</b>	<b>20</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Emissões de dióxido de carbono em rotas convencionais</b>	<b>21</b>
<b>4.4</b>	<b>ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO VERDE</b>	<b>22</b>
<b>4.4.1</b>	<b>HDRI (Redução direta do minério de ferro por hidrogênio)</b>	<b>24</b>
<b>4.4.2</b>	<b>MOE (eletrólise de óxido fundido)</b>	<b>27</b>
<b>4.4.3</b>	<b>LTE (eletrólise de baixa temperatura)</b>	<b>30</b>
<b>4.5</b>	<b>OUTRAS MANEIRAS DE REDUZIR IMPACTOS AMBIENTAIS</b>	<b>33</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Reciclagem da sucata</b>	<b>33</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Iniciativas privadas sustentáveis</b>	<b>33</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Produção de carvão vegetal</b>	<b>34</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Análise SWOT</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>39</b>

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Investimentos diretos para prevenção e mitigação de impactos ambientais	7
Tabela 2. Consumo de matérias-primas pela siderurgia no Brasil entre 2021 e 2024	9
Tabela 3. Matriz energética siderúrgica brasileira nos anos de 2021 a 2024	10
Tabela 4. Emissão específica de CO <sub>2</sub> da siderurgia brasileira	11
Tabela 5. Emissão de CO <sub>2</sub> e gases de efeito estufa por tonelada de aço bruto	21
Tabela 6. Iniciativas para produção de aço verde	23
Tabela 7. Análise SWOT para a produção de aço sustentável	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma da produção de aço em usinas integradas e semi-integradas.	12
Figura 2. Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	13
Figura 3. Stacker e Reclaimer (Empilhadeira Recuperadora)	14
Figura 4. Sequência de operação de processo LD	18
Figura 5. Representação esquemática da célula de eletrólise de óxido fundido (MOE) desenvolvida pela Boston Metal	29
Figura 6. Ilustração de fluxograma de produção de ferro pelo método “LTE”	31

# 1. INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica configura-se como um dos setores estratégicos para o desenvolvimento econômico de um país, desempenhando papel fundamental em diversas áreas essenciais à sociedade. O aço, principal produto desse setor, é amplamente utilizado em aplicações que vão desde bens de consumo e utilidades domésticas até segmentos como transporte, construção civil, geração de energia e agricultura. Destaca-se por sua elevada versatilidade, durabilidade e competitividade econômica, características que o consolidam como um dos materiais mais relevantes para a infraestrutura e o progresso tecnológico contemporâneo (NOGUEIRA; MADUREIRA, 2022; AÇO BRASIL, 2026; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

O ferro é obtido a partir da remoção de oxigênio e de outras impurezas presentes no minério de ferro, por meio de processos de redução. Quando esse ferro é posteriormente combinado com carbono, sucata metálica reciclada e pequenas quantidades de outros elementos, forma-se o aço. O aço pode ser definido como uma liga metálica composta predominantemente por ferro e carbono, contendo geralmente menos de 2% de carbono e aproximadamente até 1% de manganês, além de pequenas quantidades de elementos como silício, fósforo, enxofre e oxigênio. A presença e o controle desses elementos influenciam diretamente as propriedades mecânicas e químicas do material, permitindo sua ampla aplicação em diferentes setores industriais (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023).

Outro aspecto relevante do aço é sua elevada reciclabilidade, sendo considerado um material que pode ser reaproveitado inúmeras vezes sem perda significativa de suas propriedades. A utilização de sucata metálica como matéria-prima reduz a necessidade de extração de recursos naturais, além de contribuir para a diminuição do consumo energético e das emissões associadas ao processo produtivo, inserindo o aço no contexto da economia circular. No Brasil, empresas como a Gerdau e a ArcelorMittal destacam-se nesse cenário, atuando de forma expressiva na coleta, processamento e reciclagem de sucata ferrosa, reinserindo esse material na cadeia produtiva do aço e reforçando práticas voltadas à sustentabilidade no setor siderúrgico (ARCELORMITTAL, 2026a; GERDAU, 2026a).

Ainda no contexto nacional, o Brasil se destaca como um grande produtor de aço. Em 2024 tinha 31 usinas, administradas por 11 grupos empresariais (ArcelorMittal, Grupo

Gerda, CSN, Usiminas, entre outros), produzindo cerca de 33,9 milhões de toneladas de aço com um total de 117.439 de colaboradores (efetivo próprio total + efetivo de terceiros) e um saldo comercial de 1,8 bilhões de dólares, se consolidando como o décimo segundo exportador mundial de produtos siderúrgicos e o nono maior produtor de aço bruto (AÇO BRASIL, 2026).

Apesar de suas inúmeras vantagens e ampla aplicabilidade, a produção convencional do aço ainda está associada a elevados impactos ambientais, principalmente em função de ser uma atividade intensiva em energia e carbono, uma vez que o carbono desempenha papel fundamental na redução do minério de ferro e na formação do material. Em nível global, a indústria siderúrgica é responsável por aproximadamente 7% a 8% das emissões de gases de efeito estufa (GEE), evidenciando sua relevância nas estratégias de mitigação climática. No Brasil, esse setor contribui com cerca de 4% das emissões nacionais (LIMA et al., 2024;; AÇO BRASIL, 2026; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

Em vista da crescente conscientização da sociedade, acordos e conferências internacionais voltados ao enfrentamento das mudanças climáticas, como o Acordo de Paris e as Conferências das Partes (COPs), reforçaram a necessidade de redução significativa das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e da adoção de práticas industriais mais sustentáveis. Além disso, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), evidenciam a importância da transformação dos processos produtivos industriais frente às demandas ambientais contemporâneas (BEZERRA et al., 2021; COP30 BRASIL, 2026; ONU, 2026).

Nesse contexto, surgem alternativas tecnológicas voltadas à redução das emissões no setor siderúrgico, dando origem ao conceito de aço verde, tema central das discussões contemporâneas sobre sustentabilidade industrial. De forma geral, o aço verde refere-se à produção do aço por meio de métodos mais sustentáveis, priorizando a redução das emissões de carbono, gases do efeito estufa e de outros impactos ambientais associados ao processo produtivo. Dessa forma, o desenvolvimento e a consolidação dessas tecnologias tornam-se fundamentais para a transição da siderurgia em direção a modelos produtivos mais alinhados às atuais demandas ambientais e energéticas globais (GRIFFIN; HAMMOND, 2021; SIDDIQUI, 2023; LIMA et al., 2024).

A utilização do aço não é uma questão a ser debatida sob a perspectiva de interromper sua produção, mesmo diante dos impactos ambientais associados a ele. Trata-se de um

material imprescindível para a sociedade, amplamente empregado em setores como infraestrutura, construção civil, transporte, geração de energia e desenvolvimento industrial. Entretanto, frente às crescentes demandas globais por sustentabilidade e redução das emissões de gases de efeito estufa, torna-se necessário discutir como adequar a produção siderúrgica ao novo contexto mundial estabelecido por acordos internacionais, metas climáticas e objetivos voltados ao desenvolvimento sustentável.

## **2. OBJETIVO**

Diante do cenário apresentado, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica acerca da produção do aço verde, abordando o panorama atual da siderurgia nacional e as principais alternativas tecnológicas associadas à redução dos impactos ambientais do setor. Objetiva-se apresentar e discutir os caminhos que vêm sendo desenvolvidos para promover a descarbonização da produção do aço, incluindo processos voltados à redução das emissões de carbono, utilização de energia limpa, ampliação da reciclagem de sucata metálica e desenvolvimento de rotas produtivas mais sustentáveis.

Além disso, o trabalho pretende contextualizar o cenário brasileiro relacionado ao aço verde, destacando tendências, desafios e perspectivas para a transição sustentável da indústria siderúrgica, bem como a relevância desse processo frente às atuais exigências ambientais, tecnológicas e mercadológicas.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e descritiva, desenvolvida a partir da análise de publicações relacionadas à produção de aço verde e às estratégias de descarbonização da indústria siderúrgica.

A pesquisa foi realizada utilizando materiais publicados em bases de dados e plataformas acadêmicas, como o Portal CAPES, por meio da consulta a artigos científicos, relatórios técnicos, publicações institucionais, dissertações, teses e outros documentos relacionados ao tema. Foram consultados prioritariamente os artigos mais relevantes publicados a partir de 2021, visando à atualização dos dados apresentados. As buscas foram realizadas utilizando as palavras-chave "aço verde", "siderurgia sustentável", "descarbonização" e "transição energética", bem como seus equivalentes em língua inglesa ("green steel", "sustainable steelmaking", "decarbonization" e "energy transition"), de modo a ampliar o alcance da pesquisa. A seleção dos materiais considerou critérios de relevância para o tema, atualidade e reconhecimento na literatura, priorizando publicações amplamente referenciadas pela comunidade científica.

A partir disso, foi realizada uma análise descritiva das informações encontradas na literatura, buscando identificar as principais rotas tecnológicas associadas à produção de aço de baixa emissão de carbono. Além disso, foram utilizados artigos nacionais com o objetivo de contextualizar o cenário brasileiro e comparar sua perspectiva em relação ao panorama global.

Para a fundamentação teórica relacionada à produção convencional do aço, também foram utilizados livros e artigos publicados em períodos anteriores ao ano de 2010, considerando que se trata de um processo amplamente consolidado na literatura técnico-científica.

Por fim, os dados e informações obtidos foram organizados de forma a possibilitar a contextualização do cenário atual da siderurgia e das principais estratégias voltadas à redução dos impactos ambientais associados à produção do aço.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Surgimento do Aço**

A história do aço está diretamente relacionada ao desenvolvimento da humanidade e à evolução das técnicas metalúrgicas ao longo dos séculos. Os primeiros contatos do homem com o ferro ocorreram por meio do ferro meteorítico, utilizado por civilizações antigas, como as do Egito e da Mesopotâmia, na fabricação de ferramentas, armas e adornos. Em diversas culturas, o ferro era associado ao “metal vindo do céu” (MOURÃO et al., 2007).

A metalurgia, entendida como o conjunto de processos físicos e químicos utilizados para extração e transformação dos metais, surgiu há mais de seis mil anos no Oriente Próximo. Inicialmente, o bronze foi o principal material metálico utilizado pelas civilizações antigas. Posteriormente, povos da região da Anatólia, como os hititas, passaram a dominar técnicas de produção do ferro entre aproximadamente 1400 a.C. e 1200 a.C., utilizando-o na fabricação de armas e ferramentas, o que contribuiu para a expansão do Império Hitita na região da Mesopotâmia (AÇO BRASIL, 2026; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

O aço surgiu acidentalmente durante os processos primitivos de redução do minério de ferro em fornos alimentados por carvão vegetal. Observou-se que o contato prolongado do ferro com o carbono resultava em um material com maior dureza e resistência mecânica, devido à incorporação de pequenas quantidades de carbono à estrutura do ferro. Essa descoberta marcou o início do desenvolvimento do aço como liga metálica (AÇO BRASIL, 2026; MOURÃO et al., 2007; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

Apesar de possuir origem antiga, foi durante a Revolução Industrial, entre os séculos XVIII e XIX, que a produção de aço ganhou escala industrial e passou a desempenhar papel fundamental no desenvolvimento econômico e tecnológico. A demanda crescente por infraestrutura, ferrovias, navios e máquinas promoveu o aprimoramento dos processos siderúrgicos e da produção do aço (AÇO BRASIL, 2026; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

Ao longo do século XX, a siderurgia passou por importantes avanços tecnológicos, como a consolidação dos conversores a oxigênio básico e dos fornos elétricos a arco, permitindo maior produtividade, melhor controle da composição química do aço e maior

reaproveitamento de sucata metálica. Embora os processos tenham evoluído significativamente, a essência da siderurgia permanece, isto é, utilizar uma fonte de carbono associada a um sopro de ar para promover a redução do minério de ferro para produzir aço com propriedades adequadas à aplicação desejada (AÇO BRASIL, 2026; MOURÃO et al., 2007; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

## 4.2 Dados de sustentabilidade na siderurgia no Brasil

No Brasil, a sustentabilidade tem se tornado um dos principais pilares estratégicos da indústria do aço. O setor vem realizando investimentos contínuos em melhorias ambientais, eficiência energética, reaproveitamento de sucata, coprodutos e redução das emissões atmosféricas. Na Tabela 1 é possível enxergar a evolução dos investimentos diretos destinados à prevenção e mitigação de impactos ambientais realizados pela indústria siderúrgica brasileira entre os anos de 2021 e 2024. No momento da realização deste trabalho não havia dados disponíveis acerca do ano de 2025.

Tabela 1: Investimentos diretos para prevenção e mitigação de impactos ambientais

Ano	Investimentos (milhões US\$)
2021	216
2022	202
2023	342
2024	625

Fonte: Adaptada de Instituto Aço Brasil (2026).

Observa-se um aumento significativo dos investimentos destinados à prevenção e mitigação de impactos ambientais ao longo do período analisado, com destaque para 2024, quando os investimentos mais do que triplicaram em relação a 2022. Esse crescimento é um possível indício do fortalecimento das estratégias de sustentabilidade e alinhamento do Brasil com a tendência mundial.

### **4.2.1 Consumo de matéria-prima**

Além dos investimentos ambientais, a sustentabilidade na siderurgia está diretamente ligada ao uso eficiente dos recursos naturais. O monitoramento do consumo de matérias-primas permite avaliar tendências relacionadas à produtividade, eficiência operacional e redução do uso de recursos não renováveis. Na Tabela 2 está compilado o consumo de matérias-primas de minérios e fundentes, carvão e coque, metálicos e ligas, insumos energéticos e outros insumos utilizados nos processos siderúrgicos.

De modo geral, os dados referentes ao consumo de matérias-primas e insumos entre 2021 e 2024 demonstram que a siderurgia brasileira manteve sua capacidade produtiva, apresentando flutuações no consumo dos diferentes insumos ao longo do período analisado.

Observam-se variações no consumo de matérias-primas tradicionais, como minério de ferro, sinter e carvão mineral coqueificável, bem como de insumos energéticos, como gás natural e energia elétrica, refletindo diferenças nas condições operacionais e nas rotas de produção adotadas pelas usinas. O consumo de sucata metálica permaneceu expressivo durante todo o período, evidenciando sua relevância para a reciclagem e para a redução da necessidade de extração de recursos naturais.

Embora os dados indiquem mudanças no perfil de utilização de alguns insumos, o período analisado e as oscilações observadas não permitem afirmar, de forma conclusiva, a existência de uma tendência de redução do consumo ou de melhor eficiência no uso dos recursos.

**Tabela 2: Consumo de matérias-primas pela siderurgia no Brasil entre 2021 e 2024.**

Matéria-prima	2021	2022	2023	2024
Minério de ferro (mil t)	27.684	26.443	25.684	25.878
Pellets (mil t)	11.622	10.461	9.885	11.228
Sinter (mil t)	26.903	25.891	25.823	25.428
Minério de manganês (mil t)	101	78	67	65
Calcário (mil t)	2.613	2.428	2.214	1.871
Dolomita (mil t)	1.918	1.707	1.618	1.581
Cal (mil t)	2.489	2.584	2.595	2.866
Fluorita (t)	7.169	27.01	18.48	4.303
Carvão vegetal (mil t)	1.746	1.697	1.454	1.533
Carvão mineral coqueificável (mil t)	9.603	8.358	8.643	8.041
Carvão PCI (mil t)	3.921	3.766	3.793	3.723
Coque (mil t)	9.038	8.551	8.349	8.99
Coque de petróleo (mil t)	1.247	1.263	1.1	1.471
Ferro-gusa (mil t)	25.243	23.914	23.394	24.238
Sucata de ferro e aço (mil t)	9.328	8.973	7.787	8.719
Gás natural (10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> )	954	927	1.017	1.079
GLP (t)	32.49	11.63	15.05	28.61
Óleo combustível (t)	10.67	8.42	6.31	9.09
Energia elétrica (10 <sup>3</sup> MWh)	16.417	15.529	14.153	14.679
Oxigênio (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	3.743	2.983	2.963	2.991
Alumínio (t)	53.593	48.87	86.19	40.382
Carbureto de cálcio (t)	15.17	37.1	22.23	6.281
Carbureto de silício (t)	6.78	9.22	5.43	2.681
Eletrodos de grafite (t)	13.97	13.87	11.357	17.572

Fonte: Adaptada de Instituto Aço Brasil (2026).

## 4.2.2 Matriz energética e emissão de CO<sub>2</sub>

Além da análise dos insumos empregados na produção, a sustentabilidade da siderurgia pode ser avaliada por indicadores relacionados ao consumo de energia e às emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a origem da energia elétrica utilizada, a composição da matriz energética e as emissões específicas de dióxido de carbono constituem importantes parâmetros para avaliar o avanço do setor em direção a processos produtivos de menor impacto ambiental.

Sabe-se que, em 2024, cerca de 50% da matriz energética brasileira foi proveniente de uma fonte renovável, incluindo lenha, carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica e solar, o que é uma vantagem para o Brasil no contexto da transição energética e frente ao desafio da descarbonização industrial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025).

No entanto, ao analisar especificamente o setor siderúrgico brasileiro, observa-se uma composição energética bastante distinta, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz energética siderúrgica brasileira nos anos de 2021 a 2024.

Fonte energética	2021	2022	2023	2024
Carvão mineral/coque	74,2%	73,5%	75,1%	72,6%
Derivados de petróleo	12,6%	13,2%	12,9%	15,1%
Carvão vegetal	8,4%	8,6%	7,5%	7,6%
Energia elétrica	4,8%	4,7%	4,5%	4,7%

Fonte: Adaptada de Instituto Aço Brasil (2026).

O carvão mineral e o coque permanecem como as principais fontes de energia utilizadas na produção do aço, respondendo por mais de 70% da matriz energética do setor. Ademais, se forem somados os percentuais de consumo de carvão mineral/coque com os derivados de petróleo, estes aumentaram em 0,9% para um total de 87,7% no ano de 2024. Em contrapartida, a participação da energia elétrica permanece inferior a 5%, evidenciando a elevada dependência de combustíveis fósseis nos processos convencionais de produção.

Essa diferença em relação à matriz energética nacional decorre do fato de que, na rota predominante de produção por alto-forno, o coque e o carvão mineral não são utilizados apenas como fontes de energia, mas também como agentes redutores à remoção do oxigênio do minério de ferro. Assim, mesmo em um país com elevada participação de fontes renováveis na matriz energética, a produção convencional de aço continua fortemente dependente de combustíveis fósseis, o que se reflete no alto índice de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme é visto na Tabela 4.

Tabela 4: Emissão específica de CO<sub>2</sub> da siderurgia brasileira.

Ano	Emissão específica (t CO <sub>2</sub> /t aço bruto)
2021	1,9
2022	1,7
2023	1,8
2024	1,7

Fonte: Adaptada de Instituto Aço Brasil (2026).

É notável que as emissões específicas permaneceram praticamente estáveis entre 2021 e 2024, oscilando entre 1,7 e 1,9 t CO<sub>2</sub> por tonelada de aço bruto. Essa pequena variação indica que, apesar dos investimentos em eficiência e sustentabilidade realizados pelo setor, ainda não houve uma redução significativa na intensidade das emissões. Tendo em mente que em 2024 foram produzidas 33,9 milhões de toneladas de aço bruto, as indústrias siderúrgicas brasileiras foram responsáveis por emitir cerca de 57,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera neste ano (AÇO BRASIL, 2026).

O resultado reforça a necessidade de adoção de rotas tecnológicas de baixa emissão de carbono, como a redução direta com hidrogênio e outras tecnologias emergentes discutidas ao longo deste trabalho, capazes de reduzir a dependência do carbono fóssil e contribuir para a descarbonização da siderurgia brasileira.

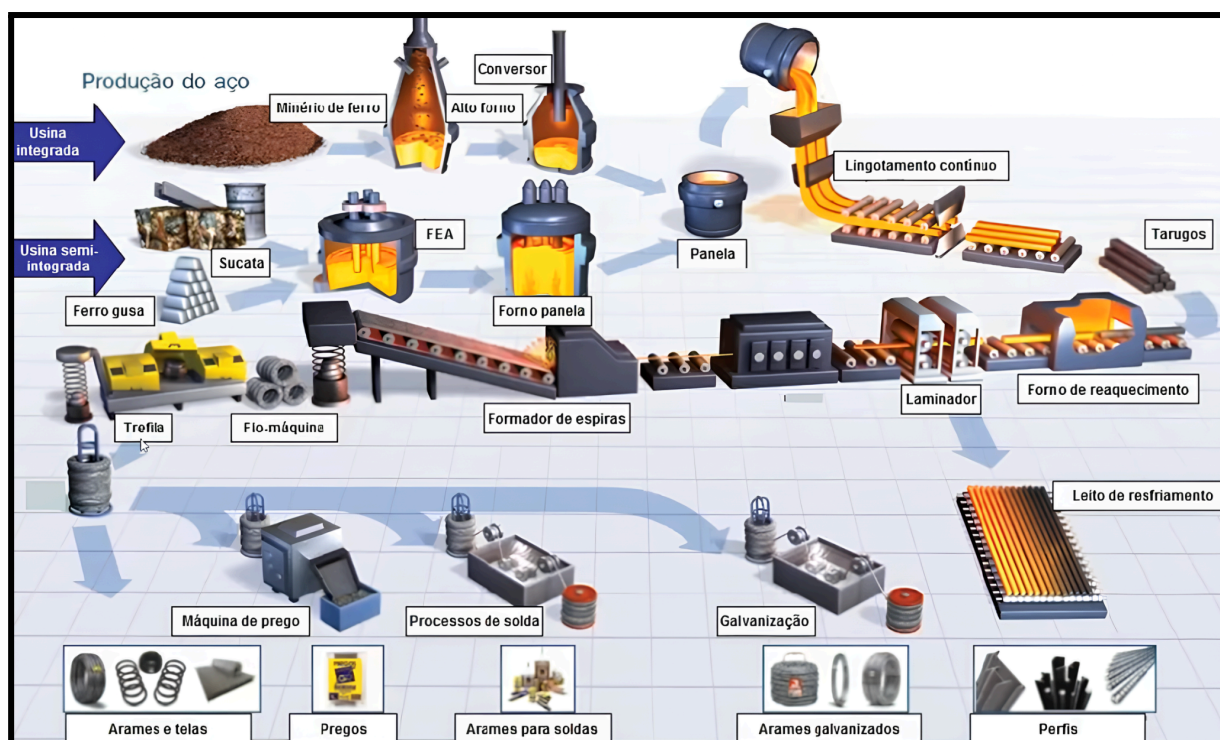
### 4.3 Processo Produtivo Convencional do Aço

A produção do aço é realizada em usinas siderúrgicas, que, a depender da origem da matéria-prima, podem ser classificadas em integradas e semi-integradas. Nas usinas

integradas, o aço é produzido a partir do minério de ferro, que passa pelos processos de redução nos altos-fornos até a obtenção do ferro-gusa, posteriormente convertido em aço. Já as usinas semi-integradas utilizam principalmente sucata metálica como matéria-prima, empregando fornos elétricos para a produção do aço (AÇO BRASIL, 2026; MOURÃO et al., 2007; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

O processo siderúrgico se dá conforme esquematizado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma da produção de aço em usinas integradas e semi-integradas.



Fonte: Gerdau (2026a).

Neste trecho do trabalho (seção 4.3), será abordado o processo das usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas, com foco na preparação das matérias-primas, nas etapas da produção do aço no alto-forno e em rotas alternativas, porém também consolidadas como fornos elétricos a arco e redução direta do minério de ferro.

### 4.3.1 Matéria-prima

As matérias-primas essenciais para siderúrgicas integradas e semi-integradas são: minérios, redutores, combustíveis, fundentes, sucatas, ferros-liga, desoxidantes, dessulfurantes e refratários. Já as utilidades são a água, o oxigênio e a energia elétrica (MOURÃO et al., 2007).

#### 4.3.1.1 O minério de ferro

Entre as matérias-primas empregadas no processo, o minério de ferro é o mais importante tanto em custo quanto em sua quantidade. O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais desse recurso, superiores a 49 bilhões de toneladas. Os principais minérios utilizados pela indústria siderúrgica são a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), com aproximadamente 72% de ferro, e a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que contém cerca de 70% de ferro e constitui o minério mais utilizado na produção de aço, sendo encontrada em grandes jazidas na região de Carajás, no estado do Pará (SILVA, 2011).

O minério de hematita (Figura 2) extraído das minas passa por britagem para adequação granulométrica, gerando partículas finas que dificultam sua utilização direta no alto-forno. Para solucionar esse problema, esses finos são aglomerados por meio dos processos de sinterização ou pelletização, formando materiais com maior permeabilidade. Essa característica favorece o contato entre a carga metálica e o gás redutor (CO), aumentando a eficiência da redução do minério e contribuindo para a diminuição do consumo de coque no processo siderúrgico (SILVA, 2011).

Figura 2: Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).



Fonte: Steel Rocha Mineração (2026).

#### 4.3.1.2 Preparação das matérias-primas

O processo siderúrgico inicia-se com a preparação das matérias-primas, principalmente minério de ferro, carvão mineral e calcário. Inicialmente, os materiais são armazenados e homogeneizados em pilhas nos pátios de matérias-primas, utilizando stackers e reclaimers (Figura 3). (BAPTÍSTA, 2016; MOURÃO et al., 2007).

Figura 3: Stacker e Reclaimer (Empilhadeira Recuperadora)



Fonte: IACO Aprendizagem Corporativa (2026).

O stacker é responsável pela formação das pilhas em camadas, promovendo a homogeneização dos materiais. Já o reclaimer realiza a recuperação do material por cortes transversais, reduzindo a segregação e garantindo maior uniformidade da mistura encaminhada aos processos seguintes (AÇO BRASIL, 2026; CHIAVERINI, 2008; MOURÃO et al., 2007).

Em seguida, o minério de ferro é direcionado para a sinterização, processo que aglomera partículas finas formando o sinter, material adequado para utilização no alto-forno. Já o carvão mineral segue para a coqueria, onde ocorre a coqueificação, produzindo o coque,

utilizado como combustível e agente redutor no processo siderúrgico (CHIAVERINI, 2008; MOURÃO et al., 2007).

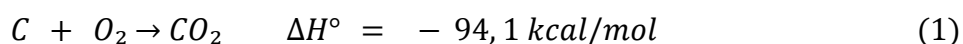
Esse material a sinterizar é carregado sobre uma esteira de grelhas e aquecido a altas temperaturas a partir do forno de ignição a aproximadamente 1200 °C, sofrendo combustão pelo ar succionado de cima para baixo ao longo do leito. O material é então resfriado, britado e peneirado, formando-se um material sólido, aglomerado e poroso (CHIAVERINI, 2008; MOURÃO et al., 2007).

Após os processos de sinterização e coqueificação, o sinter e o coque são transportados por correias até a casa de silos, onde cada material é armazenado separadamente em silos equipados com balanças. Após a pesagem, realizada de acordo com a composição química desejada do ferro-gusa e da escória, os materiais são encaminhados ao topo do alto-forno por correias transportadoras ou carros skip, isto é, recipientes metálicos movimentados por trilhos e sistemas de içamento (CHIAVERINI, 2008; MOURÃO et al., 2007).

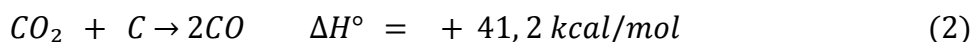
### 4.3.2 Alto-forno

O alto-forno (*blast furnace*) é o principal equipamento utilizado para a produção de ferro-gusa líquido, operando como um reator de contracorrente no qual a carga sólida desce enquanto os gases quentes ascendem, promovendo simultaneamente trocas térmicas e reações químicas entre sólidos, líquidos e gases. Ao longo de sua altura, existe um gradiente de temperatura que varia de aproximadamente 150 °C, no topo, até mais de 2.000 °C na região das ventaneiras, onde ocorre a combustão do coque e a formação dos gases redutores responsáveis pela redução do minério de ferro (CHIAVERINI, 2008; MOURÃO et al., 2007).

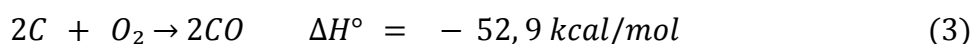
Na zona de combustão, o carbono do coque reage inicialmente com o oxigênio do ar aquecido, formando dióxido de carbono e liberando grande quantidade de energia, conforme a Equação 1.



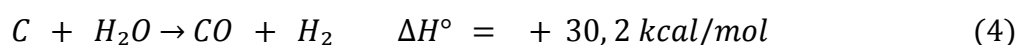
Entretanto, devido às elevadas temperaturas e ao excesso de carbono presente nessa região, o CO<sub>2</sub> formado reage novamente com o coque por meio da reação de Boudouard, representada pela Equação 2.



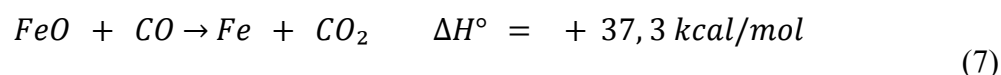
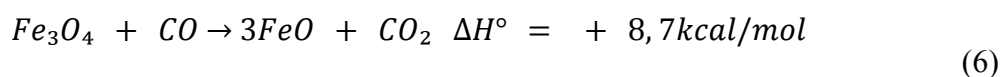
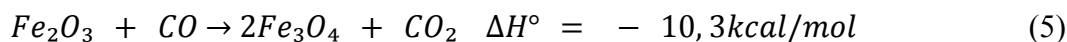
Resultando, globalmente, na formação de monóxido de carbono segundo a reação de Equação 3:



Parte da umidade presente no ar soprado também pode reagir com o carbono, produzindo monóxido de carbono e hidrogênio, conforme a Equação 4:



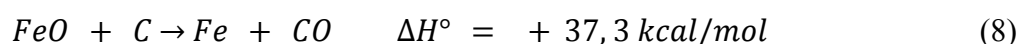
Os gases redutores produzidos ascendem pelo forno e promovem a redução indireta dos óxidos de ferro em etapas sucessivas, iniciando pela transformação da hematita em magnetita (Equação 5), seguida da redução da magnetita para wustita (Equação 6) e finalmente, da redução da wustita para ferro metálico (Equação 7).



Essas reações constituem a chamada redução indireta, sendo responsáveis pela maior parte da remoção do oxigênio do minério. Globalmente, esse conjunto de reações é levemente

exotérmico e proporciona melhor aproveitamento da energia química do carbono, uma vez que o produto final é o CO<sub>2</sub>.

Entretanto, em temperaturas superiores a aproximadamente 950 °C, na chamada zona de elaboração, o CO<sub>2</sub> produzido pela redução indireta reage novamente com o coque através da reação de Boudouard, regenerando monóxido de carbono e restabelecendo o potencial redutor do gás. A combinação dessa reação com a redução da wustita resulta na denominada redução direta, cuja reação global é:



A redução direta é altamente endotérmica e promove maior consumo e degradação do coque. Apesar de consumir menos carbono por mol de oxigênio removido, ela exige absorção significativa de calor do processo. Por esse motivo, busca-se maximizar a redução indireta, que apresenta melhor eficiência térmica e menor consumo de combustível. A introdução de hidrogênio como componente do gás redutor também favorece esse equilíbrio, deslocando as reações no sentido da redução indireta (MOURÃO et al., 2007).

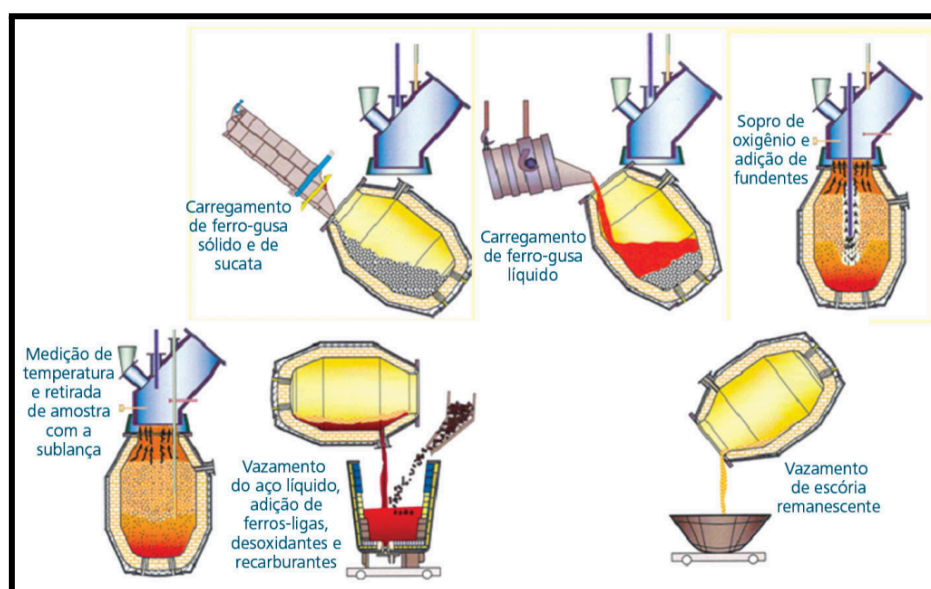
Paralelamente, nas reações de redução a 800 °C, o calcário adicionado à carga sofre calcinação, formando óxido de cálcio (CaO). Esse composto reage com a ganga do minério e com as cinzas do coque para formar a escória, que além de absorver impurezas, desempenha papel importante na dessulfuração do gusa (SILVA, 2011).

Ao final do processo obtém-se o ferro-gusa líquido, composto tipicamente por 92% a 95% de ferro e 3,5% a 5,0% de carbono, além de pequenas quantidades de silício, manganês e outros elementos. O processo também gera escória e gás de alto-forno, ambos amplamente reaproveitados em outras etapas da usina siderúrgica. A eficiência operacional depende da boa permeabilidade da carga e do máximo aproveitamento dos gases redutores, sendo desejável que estes deixem o forno com elevada concentração de CO<sub>2</sub> e baixa temperatura. Após passarem pelos sistemas de limpeza, os gases podem ser reutilizados no aquecimento do ar soprado pelas ventaneiras, enquanto o ferro-gusa segue para a aciaria e a escória é separada por diferença de densidade, sendo destinada a outras aplicações, por exemplo na produção de cimento (CHIAVERINI, 2008; MOURÃO et al., 2007; SILVA, 2011).

### 4.3.3 Aciaria

A aciaria é a unidade da usina siderúrgica responsável pela transformação do ferro-gusa em aço por meio de processos de refino metalúrgico em altas temperaturas. Nas usinas integradas, a produção de aço é realizada predominantemente por conversores a oxigênio pelo processo LD (Linz-Donawitz; Figura 4), no qual oxigênio de elevada pureza é soprado sobre o gusa líquido contido em um conversor revestido internamente com material refratário básico. O oxigênio promove a oxidação do carbono e de impurezas como silício, manganês, fósforo e parte do enxofre, reduzindo seus teores e convertendo o ferro-gusa em aço líquido (SILVA, 2011).

Figura 4: Sequência de operação de processo LD.



Fonte: Adaptada de Rizzo (2006).

A carga do conversor é composta principalmente por ferro-gusa líquido, que representa 70% a 90% da carga metálica, complementada por sucata de aço reciclada. A sucata atua como material refrigerante, absorvendo calor liberado pelas reações de oxidação e contribuindo para o reaproveitamento de resíduos. Além disso, são adicionados fundentes, principalmente cal (CaO) e fluorita, responsáveis pela formação de uma escória básica que absorve impurezas e favorece as reações de dessulfuração e desfosforação (SILVA, 2011).

Durante o sopro de oxigênio, a intensa oxidação dos elementos presentes no gusa libera calor suficiente para manter o processo sem a necessidade de combustível adicional. Ao final

do refino, obtém-se aço líquido com composição química controlada, enquanto a escória formada incorpora os óxidos gerados durante o processo, e podendo ser destinada a outras aplicações industriais. Após o vazamento do conversor, o aço segue para tratamentos secundários, nos quais podem ser adicionadas ferroligas e desoxidantes para ajuste fino da composição química e das propriedades do material antes do lingotamento contínuo e das etapas subsequentes de conformação mecânica (SILVA, 2011).

#### 4.3.4 Forno elétrico a arco (FEA)

O forno elétrico a arco (FEA) realiza a fusão da carga metálica por meio da energia gerada pelo arco elétrico formado entre eletrodos de grafita e o material carregado no interior do forno. A corrente elétrica alternada é reduzida por transformadores para tensões entre 80 e 250 V e conduzida aos eletrodos, que podem ser movimentados verticalmente para controlar o comprimento do arco e a transferência de calor para a carga (SILVA, 2011).

O processo é composto pelas etapas de carregamento da carga, fusão, refino oxidante, refino redutor e vazamento. A carga é constituída predominantemente por sucata de aço, cuja composição química deve ser previamente controlada pela seleção da sucata e adição dos elementos faltantes. Esta carga é distribuída em cestos de forma a otimizar a fusão e proteger o revestimento refratário do forno. Após o carregamento e o fechamento da abóbada, a “tampa” do forno, os eletrodos são aproximados da sucata e o arco elétrico é estabelecido, iniciando sua fusão (SILVA, 2011).

Após a completa fusão da carga inicia-se o refino oxidante, realizado pela adição de minério de ferro, carepa de laminação ou pelo sopro de oxigênio no banho metálico. Nessa etapa ocorre a oxidação parcial de elementos como carbono, manganês e fósforo, cujos óxidos são incorporados à escória. A remoção do fósforo é favorecida por temperaturas mais baixas e pela presença de uma escória com elevada basicidade e boa fluidez, obtida pela adição de cal e, quando necessário, fluorita. Ao término da etapa oxidante, a escória é removida para evitar a reversão das reações de refino, especialmente a redução do fósforo novamente para o banho metálico. Em seguida, ocorre o refino redutor, destinado à desoxidação do aço e ao ajuste final de sua composição química antes do vazamento (SILVA, 2011).

Embora a utilização de sucata metálica em fornos elétricos a arco represente uma das principais estratégias para a redução das emissões de carbono na siderurgia, sua disponibilidade é limitada frente à crescente demanda mundial por aço. Cada tonelada de sucata empregada na produção siderúrgica evita a emissão de aproximadamente 1,5 tonelada de CO<sub>2</sub>, além de reduzir o consumo de cerca de 1,4 tonelada de minério de ferro, 740 kg de carvão e 120 kg de calcário. Entretanto, mesmo com o aumento previsto na disponibilidade de sucata nas próximas décadas, esse volume ainda será insuficiente para atender integralmente à demanda global, de modo que a produção de aço a partir do minério de ferro continuará representando uma parcela significativa da produção mundial (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

#### 4.3.5 Redução direta do minério de ferro (DRI)

Os processos de redução direta de ferro (DRI, sigla para Direct Reduced Iron) consistem na obtenção de ferro metálico a partir de seus minérios sem que ocorra a fusão da carga durante a redução, diferentemente da rota convencional de alto-forno, na qual o minério é reduzido e fundido simultaneamente para a produção de ferro-gusa líquido. O produto obtido é denominado ferro-esponja, nome atribuído à sua elevada porosidade. Esse produto é empregado como substituto do ferro-gusa ou da sucata na fabricação de aço, podendo ser posteriormente fundido em forno elétrico a arco (SILVA, 2011).

Entre os processos de redução direta, o MIDREX, nome referente à indústria que o desenvolveu (Midrex Technologies Inc.), é o mais difundido, sendo responsável por mais de 65% da produção mundial de DRI. O processo utiliza um forno de cuba operando à pressão ambiente, no qual minério granulado ou pelotas são alimentados pela parte superior e descem por gravidade, atravessando as zonas de pré-aquecimento, redução e resfriamento (SILVA, 2011).

O gás redutor, composto predominantemente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), é introduzido na parte inferior da zona de redução a temperaturas entre 760 e 930 °C, ascendendo em contracorrente à carga sólida e promovendo a remoção do oxigênio do minério de ferro por meio das reações de redução. Após atravessar o reator, o gás parcialmente exaurido é resfriado para condensar a água e separar poeiras arrastadas, sendo posteriormente misturado com gás natural e encaminhado ao reformador, onde, na presença

de catalisador e em temperaturas próximas de 900 °C, é convertido novamente em uma mistura rica em CO e H<sub>2</sub>, que retorna ao forno de redução. O excedente desse gás é queimado para fornecer calor ao próprio processo (SILVA, 2011).

Comparada à rota convencional baseada em alto-forno, a redução direta apresenta diversas vantagens, dentre elas destacam-se: um menor número de operações unitárias, resultando em menor investimento em instalações auxiliares, maior flexibilidade operacional, podendo operar abaixo de sua capacidade total sem grandes perdas, e menor geração de resíduos sólidos. Além disso, permite ampla utilização de sucata na fabricação do aço e possibilita o armazenamento do ferro-esponja antes da etapa de fusão. Entretanto, sua aplicação ainda é limitada pelo elevado custo dos agentes redutores gasosos e pela disponibilidade de gás natural, sendo mais competitiva em regiões com abundância desse recurso (SILVA, 2011).

#### 4.3.6 Emissões de dióxido de carbono em rotas convencionais

Na Tabela 5 é possível visualizar a emissão de gases de efeito estufa por cada uma das rotas discutidas nesta seção (4.3).

Tabela 5: Emissão de CO<sub>2</sub> e gases de efeito estufa por tonelada de aço bruto.

Rota	Emissão de tonelada de CO <sub>2</sub> /t aço bruto produzido	Emissão de toneladas de gases de efeito estufa/t de aço bruto produzido
Alto-forno + Aciaria	2,34	2,66
FEA (70% ou mais em uso de sucata metálica)	0,69	0,71
DRI-FEA	1,47	1,66
Média global	1,92	2,18

Fonte: Adaptada de World Steel Association (2026).

As emissões de gases de efeito estufa variam entre as diferentes rotas de produção do aço. Segundo a World Steel Association (2024), a rota convencional baseada em alto-forno e conversor a oxigênio (aciaria) apresenta intensidade de emissões de aproximadamente 2,34t de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço bruto produzido, associada ao elevado consumo de coque

derivado do carvão mineral, utilizado como combustível e agente redutor na redução do minério de ferro.

Por outro lado, a rota baseada em forno elétrico a arco utilizando sucata metálica (FEA) apresenta emissões de apenas 0,69t de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço, devido à eliminação das etapas de redução do minério e coqueificação. Já a rota de redução direta seguida de forno elétrico (DRI-FEA) apresenta emissões intermediárias, cerca de 1,47t de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço, em razão da utilização de gás natural como agente redutor na produção do ferro-esponja.

Considerando que a média global de emissões é de 1,92 t de CO<sub>2</sub> por tonelada de aço bruto, observa-se que essas rotas possuem elevado potencial para reduzir a intensidade de carbono da siderurgia, constituindo importantes alternativas para a descarbonização do setor.

#### **4.4 Rotas de produção do aço verde**

As principais tecnologias de produção de aço verde estão compiladas na Tabela 6 a seguir:

As principais iniciativas voltadas à produção de aço verde encontram-se concentradas, sobretudo, na Europa, onde empresas siderúrgicas vêm investindo na substituição do carvão por hidrogênio, na eletrificação dos processos e no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como a eletrólise de óxidos fundidos (MOE). Entre as tecnologias apresentadas, destaca-se a redução direta do minério de ferro com hidrogênio, evidenciando que essa rota é atualmente a alternativa mais madura para a descarbonização da siderurgia. Além disso, observa-se que a maior parte dos projetos estabelece metas de redução das emissões ou de neutralidade de carbono até 2045 e 2050, indicando que a transição para o aço verde exige planejamento de longo prazo e investimentos significativos em infraestrutura e energia renovável.

Tabela 6: Iniciativas para produção de aço verde.

Empresa	Projeto/Tecnologia	Localização	Meta
ArcelorMittal	Redução com hidrogênio cinza proveniente de gás natural	Hamburgo, Alemanha	Livre de combustíveis fósseis até 2050
HYBRIT (SSAB, LKAB e Vattenfall)	Substituição do carvão coque por hidrogênio e eletricidade livre de combustíveis fósseis	Suécia	Livre de combustíveis fósseis até 2045
Boston Metal, BHP e Vale	Tecnologia de eletrólise de óxidos fundidos (MOE)	Massachusetts, EUA	Não informado
Liberty Ostrava	Construção de fornos híbridos	República Tcheca	Fornos híbridos concluídos até 2022
Rogesa	Utilização de hidrogênio no gás de coqueria como agente redutor	Dillingen, Alemanha	Operação iniciada em 2020
Tata Steel	Captura e armazenamento de carbono sob o Mar do Norte; eletrólise da água para produção de hidrogênio e oxigênio	IJmuiden, Países Baixos	Neutralidade de carbono na Europa até 2050
Thyssenkrupp	Uso de hidrogênio como agente redutor proveniente de eletrólise alimentada por energia renovável	Duisburg, Alemanha	Primeira fase de testes em 2021; segunda fase em 2022
Voestalpine Primetals Technologies	Hidrogênio como agente redutor para processamento de concentrados de minério de ferro	Linz, Áustria	Redução de 80% das emissões de carbono até 2050
Tenaris, Edison e Snam	Produção de aço baseada em eletrólise/hidrogênio	Bérgamo, Itália	Não informado
Salzgitter AG (Projeto SALCOS)	Produção de aço baseada em eletrólise/hidrogênio	Wilhelmshaven, Alemanha	Produção de 2 milhões de toneladas/ano de DRI ao final da primeira fase (prevista para 2025)
Duferco	Uso de hidrogênio em forno de vigas com contrato de energia renovável (Green PPA)	Brescia, Itália	Não informado
Celsa, Statkraft e Mo Industrial Park AS	Produção de aço baseada em eletrólise/hidrogênio	Noruega	Redução de 50% das emissões até 2030 e descarbonização completa até 2050
H2 Green Steel Initiative (Stegra)	Produção de aço baseada em hidrogênio	Norte da Suécia	Início da produção em 2024 e meta anual de 5 milhões de toneladas de aço verde até 2030

Fonte: Adaptada de Muslemani et al. (2021).

#### 4.4.1 HDRI (Redução direta do minério de ferro por hidrogênio)

A redução direta do minério de ferro por hidrogênio (HDRI, sigla para *Hydrogen Direct Reduced Iron*) é uma das rotas possíveis para a descarbonização da indústria siderúrgica, capaz de produzir aço com emissões inferiores às observadas no processo convencional baseado em alto-forno e conversor a oxigênio. Nesse processo, o minério de ferro sólido é convertido em ferro metálico sem passar pela fase líquida, utilizando hidrogênio como agente redutor e tendo o vapor d'água como principal produto da reação, eliminando praticamente as emissões diretas de dióxido de carbono durante a etapa de redução do minério (BHASKAR et al., 2020).

Embora a tecnologia de redução direta seja empregada comercialmente há décadas utilizando gás natural ou gás de síntese (mistura de CO e H<sub>2</sub>), a substituição desses gases por hidrogênio verde representa um importante avanço para a produção sustentável de aço. O uso do hidrogênio verde na siderurgia possui potencial para reduzir aproximadamente 2,3Gt CO<sub>2</sub> por ano em escala mundial (BHASKAR et al., 2020).

O processo inicia-se com o pré-aquecimento das pelotas de minério de ferro, normalmente em temperaturas próximas de 800 °C, seguido de sua alimentação pelo topo de um forno de cuba ou forno de eixo. Simultaneamente, hidrogênio previamente aquecido é introduzido pela parte inferior do reator, estabelecendo um fluxo em contracorrente entre o gás redutor e o minério sólido, condição que maximiza a transferência de massa e favorece a eficiência das reações de redução (SILVA et al., 2024).

No interior do forno ocorre a redução gradual dos óxidos de ferro. A hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é inicialmente convertida em magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), posteriormente em wustita (FeO) e, finalmente, em ferro metálico (Fe), por meio da remoção sucessiva do oxigênio pelo hidrogênio. Acima de aproximadamente 570 °C ocorre a formação intermediária da wustita, enquanto temperaturas inferiores favorecem a redução direta da magnetita ao ferro metálico. Como consequência dessas reações, forma-se vapor d'água, enquanto parte do hidrogênio não consumido pode ser recuperada, tratada e recirculada ao processo (BHASKAR et al., 2020; SILVA et al., 2024).

A reação de redução é endotérmica, necessitando fornecimento de calor. Esse aquecimento pode ser realizado por energia elétrica, queimadores integrados ao forno ou pela combustão controlada de parte do próprio hidrogênio utilizado no processo. Estima-se que

sejam necessários aproximadamente 2,55 MWh de hidrogênio para cada tonelada de DRI produzida. Considerando toda a cadeia produtiva HDRI e posteriormente produção do aço por fornos elétricos a arco, o consumo energético alcança cerca de 3,72 MWh/t de aço líquido, valor ligeiramente superior aos 3,48 MWh/t observados na rota convencional baseada em alto-forno e conversor a oxigênio, evidenciando uma elevada demanda energética dessa rota e sua forte dependência da disponibilidade de eletricidade renovável de baixo custo (SILVA et al., 2024).

No Brasil, essa demanda energética pode ser parcialmente atendida pela elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica. Entretanto, a produção de hidrogênio verde em larga escala ainda depende da expansão da capacidade de geração renovável e da redução dos custos da eletrólise.

Além dos aspectos termodinâmicos, fatores cinéticos influenciam significativamente a velocidade da redução. A porosidade das pelotas, seu tamanho, geometria e a temperatura do gás redutor afetam diretamente a difusão do hidrogênio e, conseqüentemente, a taxa reacional. Estudos experimentais demonstram que o hidrogênio puro promove velocidades de redução superiores às obtidas por misturas contendo monóxido de carbono, principalmente na faixa entre 700 e 900 °C. Entretanto, temperaturas superiores a aproximadamente 900 °C favorecem a sinterização superficial das pelotas, formando uma camada densa que dificulta a difusão do hidrogênio para o interior do material e reduz a velocidade global da reação (BHASKAR et al., 2020).

Ao final da etapa de redução obtém-se o ferro reduzido diretamente (DRI), também denominado ferro-esponja, tal qual o processo discutido na seção 4.3.5 deste trabalho (SILVA et al., 2024). Este material

Na etapa seguinte, o DRI é encaminhado ao forno elétrico a arco (FEA), onde ocorre sua fusão e refino para produção do aço líquido. Durante esse estágio são adicionados carbono, ligas metálicas, cal e outros insumos necessários para o ajuste da composição química do aço. Em altas temperaturas também podem ocorrer reações secundárias, como a reforma a vapor do metano e a reação de deslocamento gás-água, responsáveis pela geração adicional de hidrogênio e monóxido de carbono no interior do forno (SILVA et al., 2024).

Essas reações secundárias, apesar de contribuírem para o aproveitamento energético do processo e para a geração de gases redutores no interior do forno, reduzem parcialmente os benefícios ambientais da rota baseada em hidrogênio devido à geração de CO<sub>2</sub>.

Modelagens energéticas desenvolvidas por Bhaskar et al. (2020) indicam que a rota HDRI-FEA (redução direta do minério de ferro por hidrogênio e refino em forno elétrico a arco) constitui atualmente a alternativa tecnológica mais viável para substituir a produção convencional baseada em alto-forno, apesar de apresentar consumo energético superior ao da rota dos altos fornos e conversores a oxigênio.

#### **4.4.1.1 Rota com gás natural e hidrogênio verde**

Apesar do elevado potencial ambiental da tecnologia HDRI-FEA, sua implementação em larga escala é um desafio devido ao elevado custo do hidrogênio verde e à necessidade de grandes quantidades de energia elétrica renovável. Nesse contexto, tecnologias de redução direta baseadas em gás natural surgem como alternativas intermediárias para a descarbonização gradual da siderurgia, especialmente em países que apresentam disponibilidade desse combustível. No Brasil, a expectativa de aumento da oferta de gás natural proveniente das reservas do pré-sal e o avanço do novo marco regulatório do setor podem favorecer a adoção dessa rota como etapa de transição, permitindo, futuramente, sua substituição pelo hidrogênio verde à medida que sua produção se torne economicamente competitiva (CIRINEU, 2023).

#### **4.4.1.2 Contexto atual da rota de produção**

Nos últimos anos, o hidrogênio verde passou a integrar indústrias de grande escala voltadas à descarbonização da siderurgia. Diversas empresas e projetos internacionais têm investido na produção de aço verde utilizando a rota de redução direta do minério de ferro com hidrogênio (HDRI-FEA), demonstrando que essa tecnologia caminha para sua consolidação comercial. Entre os principais exemplos está a empresa sueca Stegra (antiga H2 Green Steel), que desenvolve um complexo industrial totalmente integrado para produção de hidrogênio verde, ferro verde e aço verde no município de Boden, na Suécia. O empreendimento utiliza eletricidade proveniente de fontes renováveis, especialmente energia hidrelétrica e eólica, para alimentar um dos maiores eletrolisadores do mundo, responsável pela geração do hidrogênio utilizado na redução direta do minério de ferro. Segundo a empresa, o processo permite reduzir em até 95% as emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com a

siderurgia convencional baseada em carvão mineral, com expectativa de alcançar uma produção anual de 5 milhões de toneladas de aço verde até 2030 (STEGRA, 2026).

A viabilidade comercial dessa tecnologia também é evidenciada pelo interesse crescente de grandes consumidores industriais. Ainda quando operava sob a marca H2 Green Steel, a empresa anunciou contratos de fornecimento com fabricantes como Mercedes-Benz, Porsche, Scania e IKEA, demonstrando que há mercado para a nova tecnologia. O projeto recebeu investimentos superiores a 6 bilhões de euros, refletindo a confiança do mercado no potencial econômico da rota baseada em hidrogênio renovável e na demanda por materiais sustentáveis (ENGIE BRASIL, 2024).

No Brasil, a produção de aço verde por meio do hidrogênio renovável ainda se encontra em estágio inicial, porém importantes projetos-piloto vêm demonstrando o crescente interesse da indústria nacional nessa tecnologia. Em fevereiro de 2026, a Axia Energia anunciou uma parceria com empresas alemãs para desenvolver a primeira usina brasileira dedicada à produção de hidrogênio verde para siderurgia de baixa emissão de carbono. Pouco depois, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) inaugurou uma planta de hidrogênio verde no estado do Paraná, marcando mais um passo na avaliação da viabilidade técnica e econômica dessa rota produtiva. Essas iniciativas surgem em um momento crítico para o país, que possui vantagens competitivas como uma matriz elétrica predominantemente renovável e abundância de minério de ferro de alta qualidade, mas enfrenta desafios relacionados aos elevados investimentos necessários para a descarbonização da siderurgia e à crescente pressão exercida pelas importações de aço chinês, que reduzem a competitividade do setor nacional. Paralelamente, as perspectivas de redução dos custos do hidrogênio verde reforçam o potencial dessa tecnologia, sendo esperado que, até 2030, o custo de produção do hidrogênio seja aproximadamente 50% inferior ao observado em 2020, em função dos avanços tecnológicos e do aumento da escala produtiva (MOORE, 2026; SILVA et al., 2024).

#### **4.4.2 MOE (eletrólise de óxido fundido)**

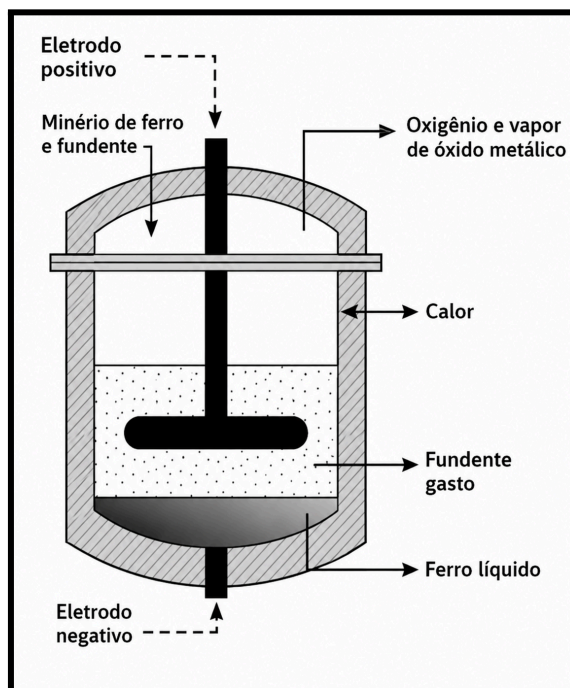
A eletrólise de óxidos fundidos (MOE, sigla para *Molten Oxide Electrolysis*) é uma das tecnologias mais inovadoras para a produção de ferro e aço de baixa emissão de carbono, por eliminar completamente a necessidade de agentes redutores à base de carbono, como coque e carvão mineral. O conceito foi desenvolvido em pesquisas conduzidas no Massachusetts

Institute of Technology (MIT) a partir de 2012 e, atualmente, está sendo escalonado para aplicação industrial pela empresa Boston Metal, criada justamente para viabilizar comercialmente essa tecnologia (HUMBERT et al., 2024; LAMEIRINHAS, 2021).

O processo consiste na redução eletroquímica direta dos óxidos de ferro presentes no minério. Em uma célula eletrolítica operando a temperaturas superiores a 1.600 °C, a passagem de corrente elétrica fornece elétrons capazes de romper as ligações químicas entre o ferro e o oxigênio, produzindo ferro líquido no cátodo enquanto o oxigênio é liberado no ânodo. Diferentemente da rota tradicional de alto-forno, não há utilização de carbono como agente redutor, eliminando praticamente todas as emissões diretas de dióxido de carbono durante a etapa de redução do minério (HUMBERT et al., 2024).

Uma característica importante da tecnologia é que a própria corrente elétrica utilizada na eletrólise é responsável pelo aquecimento do sistema, mantendo a mistura fundida na temperatura necessária para a reação ocorrer. Assim, a eletricidade desempenha simultaneamente duas funções: fornece os elétrons para reduzir o minério e gera o calor necessário para manter o eletrólito líquido. Quando essa energia é proveniente de fontes renováveis, como hidrelétricas, parques eólicos ou usinas solares, o processo pode produzir ferro com emissão praticamente nula de CO<sub>2</sub>, tendo como principal subproduto o oxigênio, conforme esquematização resumida pela Figura 5 (LAMEIRINHAS, 2021).

Figura 5: Representação esquemática da célula de eletrólise de óxido fundido (MOE) desenvolvida pela Boston Metal. .



Fonte: Adaptada de Humbert et al. (2024).

Além dos benefícios ambientais, a MOE apresenta vantagens operacionais relevantes. A tecnologia é capaz de processar minérios de ferro com diferentes teores de impurezas. Outro diferencial é sua configuração modular, permitindo a construção de unidades produtivas menores e escaláveis, em contraste com os altos-fornos convencionais, que dependem de grandes capacidades de produção para serem economicamente viáveis. A empresa Boston Metal do Brasil também estuda a aplicação dessa tecnologia para recuperar metais de alto valor presentes em escórias e resíduos minerais, promovendo maior aproveitamento de materiais considerados rejeitos e contribuindo para práticas de economia circular (HUMBERT et al., 2024; GORDON, 2023).

Apesar do elevado potencial, a eletrólise de óxidos fundidos ainda enfrenta desafios para sua consolidação industrial. O principal deles é o elevado consumo de energia elétrica, atualmente estimado em aproximadamente 5.500 kWh por tonelada de aço produzido, embora pesquisas busquem reduzir esse valor para cerca de 4.000 kWh/t com o aperfeiçoamento dos materiais dos eletrodos, da eficiência da célula eletrolítica e da recuperação de calor do processo, tornando a tecnologia mais competitiva economicamente. Dessa forma, sua viabilidade econômica depende diretamente da disponibilidade de eletricidade renovável

abundante e de baixo custo. Além disso, aspectos relacionados à durabilidade dos eletrodos, ao controle térmico da célula eletrolítica e ao comportamento das impurezas do minério ainda são objeto de pesquisa e desenvolvimento (LAMEIRINHAS, 2021).

Nos últimos anos, a tecnologia tem recebido crescente interesse da indústria siderúrgica mundial. Em 2024, a Boston Metal anunciou um aporte de US\$ 120 milhões em uma rodada de investimentos liderada pela ArcelorMittal, com participação do Climate Innovation Fund, da Microsoft, e de outros investidores estratégicos. Os recursos serão destinados à expansão da planta piloto da empresa nos Estados Unidos e ao desenvolvimento de sua primeira unidade comercial de produção de aço verde, além da construção de uma fábrica no Brasil voltada para a recuperação eletrolítica de metais de alto valor (GORDON, 2023).

Diante desse cenário, a eletrólise de óxidos fundidos é considerada uma das rotas mais promissoras para a descarbonização da siderurgia. Ao substituir combustíveis fósseis por eletricidade renovável e eliminar a emissão direta de CO<sub>2</sub> durante a redução do minério, a tecnologia apresenta potencial para revolucionar a produção de aço nas próximas décadas, contribuindo significativamente para as metas globais de neutralidade climática e para a transição da indústria siderúrgica rumo a processos produtivos mais sustentáveis (HYDROGEN INSIGHT, 2024; GORDON, 2023).

#### **4.4.3 LTE (eletrólise de baixa temperatura)**

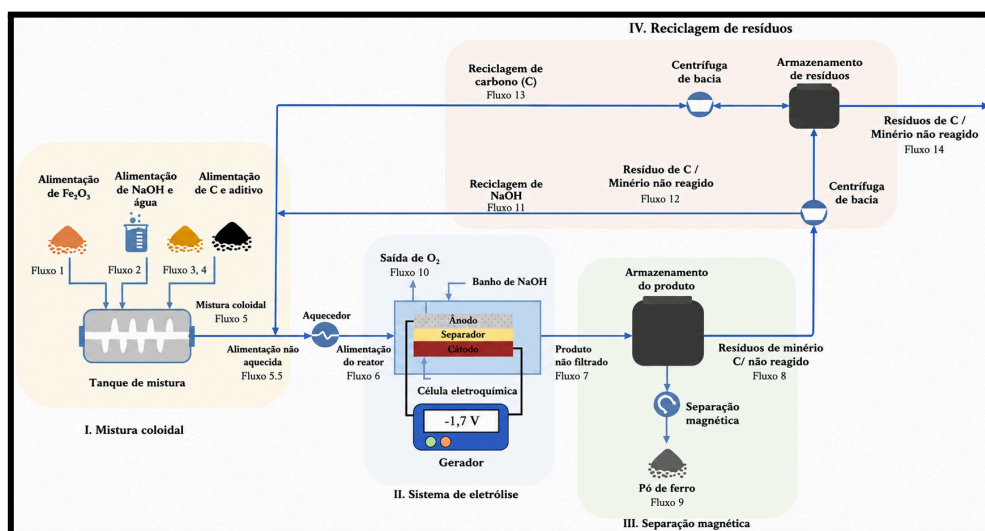
A eletrólise de baixa temperatura (Low Temperature Electrolysis, LTE) é uma das tecnologias mais recentes propostas para a produção de aço verde, buscando eliminar completamente as emissões diretas de dióxido de carbono durante a etapa de redução do minério. Diferente da rota tradicional em alto-forno em usinas integradas, que utiliza coque como agente redutor, a LTE emprega energia elétrica para promover a redução eletroquímica do óxido de ferro em meio alcalino, tendo como único subproduto gasoso o oxigênio (KOUTSOUPA et al., 2021; THANWISAI et al., 2024).

O processo ocorre em temperaturas próximas de 100 °C, valor significativamente inferior às temperaturas exigidas pelos altos-fornos convencionais, que podem alcançar 2.000 °C, e também inferior às utilizadas em outras rotas eletrolíticas, como a eletrólise de óxidos fundidos (MOE), mencionada previamente neste trabalho, que trabalha em temperaturas

superiores a 1600 °C. Nessa tecnologia, partículas de hematita ( $Fe_2O_3$ ) são inseridas em uma solução concentrada de hidróxido de sódio (NaOH), onde recebem elétrons provenientes de uma fonte externa de eletricidade, promovendo sua redução a ferro metálico (THANWISAI et al., 2024).

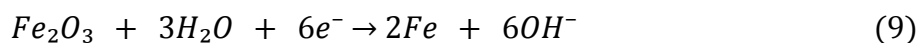
Na Figura 6 pode ser visto um fluxograma simplificado da rota de eletrólise de baixa temperatura. O processo é dividido em quatro etapas principais: mistura coloidal, eletrólise, separação magnética e reciclagem de resíduos. Inicialmente, minério de ferro ( $Fe_2O_3$ ), NaOH, água, carbono condutor e aditivos são misturados para formar uma suspensão coloidal, que é encaminhada à célula eletroquímica. Nessa etapa, a corrente elétrica promove a redução dos óxidos de ferro a ferro metálico, gerando oxigênio como único subproduto gasoso. Em seguida, o ferro produzido é separado magneticamente dos demais componentes da suspensão. Por fim, a solução de NaOH e parte do carbono são recuperados e reciclados, enquanto os resíduos não reagidos são removidos. (THANWISAI et al., 2024).

Figura 6: Ilustração de fluxograma de produção de ferro pelo método “LTE”.

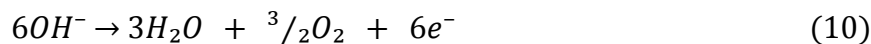


Fonte: Adaptada de Thanwisai et al. (2024).

A reação eletroquímica no cátodo está representada pela Equação 9 a seguir:



E a Equação 10, representa a reação no ânodo:



Como resultado, o processo produz ferro metálico e libera apenas oxigênio gasoso, sem formação direta de CO<sub>2</sub>. Quando a eletricidade utilizada é proveniente de fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidrelétrica, a emissão de carbono associada ao processo é eliminada (KOUTSOUPA et al., 2021).

Um dos principais desafios da tecnologia está relacionado à baixa condutividade elétrica natural do minério de ferro. Para superar essa limitação, foi desenvolvido um sistema baseado em eletrodos coloidais tridimensionais, nos quais partículas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são misturadas com carbono condutor e suspensas em solução alcalina. O carbono forma uma rede condutora que facilita o transporte de elétrons até as partículas de minério, aumentando significativamente a velocidade da reação e a eficiência do processo (THANWISAI et al., 2024).

Além disso, a utilização de espuma porosa de níquel como substrato amplia a área de reação e melhora a distribuição uniforme da corrente elétrica. Essa configuração permitiu obter ferro com pureza superior a 95% e eficiência de corrente acima de 95%, valores considerados bastante promissores para futuras aplicações industriais (THANWISAI et al., 2024).

Uma iniciativa importante no desenvolvimento de tecnologias de eletrólise de baixa temperatura é o projeto europeu ΣIDERWIN, coordenado pela ArcelorMittal e financiado pelo programa Horizon 2020 da União Europeia. Além da hematita convencional, o processo também estuda a utilização de resíduos ricos em ferro, como o resíduo de bauxita proveniente da produção de alumina, ampliando o conceito de economia circular dentro da siderurgia (KOUTSOUPA et al., 2021).

Os avanços obtidos pelo ΣIDERWIN deram origem ao projeto Volteron™, desenvolvido em parceria entre ArcelorMittal e John Cockerill. Anunciado em 2023, o projeto prevê a construção da primeira planta industrial de eletrólise direta de ferro em baixa temperatura do mundo, com início de operação previsto para 2027. Em sua primeira fase, a unidade deverá produzir entre 40 mil e 80 mil toneladas anuais de placas de ferro, podendo atingir capacidades entre 300 mil e 1 milhão de toneladas por ano após a validação da tecnologia em escala industrial. O ferro obtido será posteriormente fundido em fornos

elétricos a arco para produção do aço, eliminando completamente o uso de combustíveis fósseis na etapa de redução do minério (ARCELORMITTAL NEWSROOM, 2023).

Apesar do elevado potencial ambiental, a eletrólise de baixa temperatura ainda enfrenta desafios relacionados ao custo da eletricidade, à durabilidade dos eletrodos e à necessidade de ampliar sua escala produtiva. A análise econômica realizada por Thanwisai et al. (2024) indica que o custo de produção do ferro depende principalmente do preço do minério de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e da energia elétrica utilizada no processo. Os autores estimaram um preço mínimo de venda (*Minimum Iron Selling Price*, MISP) de aproximadamente US\$ 621,93 por tonelada de ferro, valor considerado competitivo e semelhante aos custos projetados para as rotas de produção baseadas na redução direta com hidrogênio ( $\text{H}_2$ -DRI). Além disso, os resultados experimentais demonstram emissões extremamente reduzidas, estimadas em aproximadamente 0,16 kg de  $\text{CO}_2$  por quilograma de ferro produzido quando empregada eletricidade proveniente de fontes renováveis, um nível significativamente inferior ao observado nas rotas convencionais de produção de ferro (THANWISAI et al., 2024).

## **4.5 OUTRAS MANEIRAS DE REDUZIR IMPACTOS AMBIENTAIS**

### **4.5.1 Reciclagem da sucata**

Embora a reciclagem de sucata em fornos elétricos a arco represente uma importante estratégia para reduzir as emissões de carbono da siderurgia, sua expansão é limitada pela disponibilidade desse insumo. Em 2024, o Brasil reciclou 8,7 milhões de toneladas de sucata metálica para a produção do aço, o que representa um percentual de cerca de 26% da produção do aço no mesmo ano. Entretanto, a oferta global de sucata não é suficiente para atender à crescente demanda por aço, tornando indispensável o desenvolvimento de rotas alternativas de produção sustentável a partir do minério de ferro, como aquelas baseadas em hidrogênio ou eletrólise (AÇO BRASIL, 2026; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2026).

### **4.5.2 Iniciativas privadas sustentáveis**

Além das mudanças nos processos siderúrgicos, diversas empresas do setor vêm investindo em projetos voltados à redução das emissões de carbono por meio da utilização de fontes renováveis de energia e do desenvolvimento de produtos de menor pegada ambiental, o que impacta na diminuição das emissões indiretas associadas à produção do aço.

No Brasil, a Gerdau tem ampliado seus investimentos em iniciativas voltadas à descarbonização de suas operações por meio da expansão do uso de energia renovável e da economia circular. Em parceria com a Newave Energia, a empresa inaugurou o Parque Solar de Arinos (MG), com capacidade instalada de 432 MWp (potência máxima de geração em condições ideais de irradiação solar), e área aproximada de 1.150 hectares, além do Complexo Solar de Barro Alto (GO), com cerca de 452 MWp distribuídos em 841 hectares, utilizando parte da energia gerada no abastecimento de suas unidades industriais. Além disso, lançou a linha Gerdau NewEco, produzida com aproximadamente 70% de sucata reciclada e 100% de energia proveniente de fontes renováveis, apresentando intensidade de emissões de cerca de 0,85t CO<sub>2</sub> por tonelada de aço, valor equivalente a aproximadamente metade da média global do setor. Essas iniciativas reforçam a estratégia da empresa de reduzir suas emissões e ampliar a produção de aços com menor pegada de carbono (GERDAU, 2026b; GERDAU, 2026c).

Em âmbito internacional, a ArcelorMittal desenvolveu a iniciativa XCarb®, que reúne projetos de descarbonização e produtos siderúrgicos de baixa emissão de carbono. Entre eles pode-se citar o XCarb® *recycled and renewably produced*, aço produzido em forno elétrico a arco com elevado teor de sucata reciclada e eletricidade proveniente integralmente de fontes renováveis certificadas. A empresa também utiliza certificados ambientais associados à redução de emissões em suas rotas de alto-forno, permitindo que clientes contabilizem reduções equivalentes em suas emissões indiretas (ARCELORMITTAL, 2026b).

#### **4.5.3 Produção de carvão vegetal**

A utilização de carvão vegetal produzido a partir de florestas plantadas de eucalipto constitui uma alternativa para reduzir as emissões de carbono da siderurgia, substituindo parcialmente ou totalmente o coque mineral como agente redutor e combustível nos altos-fornos. Diferentemente do carbono fóssil, o carbono presente na biomassa integra o ciclo biogênico do carbono, sendo previamente absorvido da atmosfera durante o crescimento das árvores. Nesse contexto, a Aperam BioEnergia destaca-se como referência mundial na produção sustentável de carvão vegetal, cultivando aproximadamente 76 mil hectares de florestas plantadas de eucalipto no Vale do Jequitinhonha (MG). A empresa produz cerca de 450 mil toneladas de carvão vegetal por ano, empregadas na fabricação do “Aço Verde Aperam”, além de investir na modernização de seus fornos e em sistemas patenteados de queima dos gases gerados na carbonização, tecnologia que evita a emissão de

aproximadamente 150 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano quando implantada em todas as unidades produtivas. Essas iniciativas demonstram o potencial da biomassa renovável como estratégia complementar para a descarbonização da siderurgia, especialmente em países com elevada disponibilidade de florestas energéticas plantadas (APERAM, 2023).

Apesar da denominação comercial “Aço Verde Aperam”, essa rota não é considerada, para os fins deste trabalho, como produção de aço verde em seu sentido mais restrito, uma vez que ainda utiliza carbono como agente redutor, ainda que proveniente de biomassa renovável. Entretanto, seu emprego ainda pode representar uma importante estratégia de transição para a descarbonização da siderurgia, pois reduz a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, a adoção do carvão vegetal oriundo de florestas plantadas de eucalipto é objeto de debates ambientais. Embora o cultivo em áreas degradadas possa favorecer a recuperação do solo, o sequestro de carbono e a redução da pressão sobre florestas nativas, especialistas apontam que grandes monoculturas de eucalipto, quando implantadas em locais inadequados ou manejadas de forma inadequada, podem comprometer a biodiversidade, alterar a disponibilidade hídrica e modificar ecossistemas naturais. Assim, os benefícios ambientais dessa alternativa estão condicionados ao manejo florestal e às características da região de implantação, podendo contribuir para a transição da descarbonização da siderurgia quando aplicada conforme requisitos ambientais adequados (WESTIN, 2024).

#### 4.5.4 Análise SWOT

Objetivando sintetizar as principais características das tecnologias e estratégias discutidas para a descarbonização da siderurgia, o autor deste trabalho elaborou uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*), também conhecida em português como análise FOFA (Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças). Essa ferramenta de planejamento estratégico permite identificar fatores internos favoráveis e desfavoráveis, bem como aspectos externos que podem impulsionar ou dificultar a adoção de determinada tecnologia.

No contexto da produção de aço verde, a utilização da análise SWOT possibilita comparar, de forma sistemática, o estágio de desenvolvimento, os desafios técnicos e econômicos, as oportunidades de mercado e as vantagens competitivas associadas a cada rota tecnológica. A análise está visível na Tabela 7, abaixo.

Tabela 7: Análise SWOT para a produção de aço sustentável.

Tecnologia	Forças (Strengths)	Fraquezas (Weaknesses)	Oportunidades (Opportunities)	Ameaças (Threats)
HDRI- <i>FEA</i> (Redução direta com hidrogênio verde)	Redução de até 95% das emissões; tecnologia já existe na industrial; água como principal subproduto.	Alto custo do hidrogênio verde; elevada demanda de energia renovável; nova infraestrutura.	Potencial brasileiro devido à matriz elétrica renovável e abundância de minério de ferro; possível liderança em aço verde.	Preço alto do hidrogênio; competição com aço chinês gerando incertezas de mercado.
Rota híbrida Gás Natural + Hidrogênio Verde (DRI)	Aproveita tecnologias já maduras; reduz emissões em relação ao alto-forno; facilita transição gradual.	Depende de combustível fóssil; redução pequena de emissões comparada ao HDRI puro.	Expansão do gás do pré-sal brasileiro; possível substituição gradual pelo hidrogênio.	Volatilidade do preço do gás natural; risco de ativos obsoletos com endurecimento das metas climáticas.
MOE (Molten Oxide Electrolysis)	Elimina carbono; produz oxigênio como subproduto; potencial de emissões próximas de zero.	Tecnologia ainda em desenvolvimento; alto consumo elétrico; custos elevados.	Grande potencial renovável para alimentar eletrólise.	Incerteza tecnológica; necessidade de investimentos elevados.
LTE (Eletrólise de baixa temperatura)	Processo em baixas temperaturas; emissões extremamente reduzidas; alta pureza do ferro produzido.	Tecnologia ainda laboratorial/piloto.	Aproveitamento de resíduos ricos em ferro; integração com energia renovável.	Elevado custo inicial; concorrência com tecnologias mais maduras.
Reciclagem de sucata em <i>FEA</i>	Tecnologia consolidada; grande redução das emissões; menor consumo energético e de matérias-primas.	Dependência da disponibilidade de sucata; limita crescimento da produção primária de aço.	Aumento da reciclagem nacional; aproveitamento da matriz elétrica renovável brasileira.	Escassez global de sucata.
Carvão vegetal de florestas plantadas	Tecnologia já utilizada no Brasil; reduz emissões em relação ao coque mineral; biomassa renovável.	Utiliza carbono como redutor; disponibilidade limitada de áreas para reflorestamento sustentável.	Clima favorável ao cultivo de eucalipto.	Questionamentos ambientais sobre monoculturas; não acarreta na produção de aço verde diretamente.
Iniciativas privadas sustentáveis	Implementação relativamente rápida; reduz emissões indiretas.	Não elimina as emissões de gases de efeito estufa.	Crescente demanda por aço de baixo carbono.	Concorrência internacional; não acarreta na produção de aço verde diretamente.

Fonte: Autor (2026).

Portanto, com base nas tecnologias analisadas e no contexto atual da siderurgia brasileira, a estratégia mais viável para a descarbonização do setor consiste, inicialmente, na ampliação da utilização da rota de redução direta do minério de ferro associada ao forno elétrico a arco (DRI-FEA), em conjunto com o aumento da participação da sucata metálica na produção de aço. Essa estratégia promove a redução das emissões de carbono em relação à rota convencional (alto-forno e conversor a oxigênio), ao mesmo tempo em que demanda investimentos mais compatíveis com a realidade atual da indústria nacional.

Embora a utilização do hidrogênio verde na redução direta do minério de ferro tenha o maior potencial para a produção de aço de baixo carbono, sua implementação em larga escala enfrenta limitações econômicas devido ao elevado custo associado ao hidrogênio. Esse cenário torna uma transição imediata pouco provável, especialmente considerando as dificuldades enfrentadas pela siderurgia brasileira diante do aumento das importações de aço chinês e da elevada competitividade do mercado internacional.

Nesse cenário, a transição gradual, substituindo progressivamente o gás natural por hidrogênio verde nos processos de redução direta, é o caminho mais realista. Essa abordagem permite reduzir as emissões à medida que o hidrogênio renovável se torna mais acessível. As estimativas de redução dos custos de produção do hidrogênio até 2030 em cerca de 50% em relação aos valores observados em 2020, fortalecerão sua adoção industrial.

Projetos internacionais, como os desenvolvidos na Suécia, já demonstram a viabilidade técnica da produção de aço utilizando hidrogênio verde, ainda que com custos superiores aos das rotas convencionais. No Brasil, iniciativas recentes, como os investimentos realizados pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e por outras empresas do setor, indicam que o país começa a se preparar para essa transição, aproveitando-se de sua matriz elétrica predominantemente renovável e a disponibilidade de minério de ferro.

Por fim, tecnologias emergentes como a eletrólise de óxidos fundidos (MOE) e a eletrólise de baixa temperatura (LTE) apresentam potencial ainda maior de descarbonização, porém permanecem em estágios iniciais de desenvolvimento e carecem de comprovação em escala industrial. Dessa forma, a rota DRI-FEA, com substituição gradual do gás natural por hidrogênio verde e complementada pelo aumento da reciclagem de sucata, mostra-se atualmente como a alternativa mais promissora para conciliar competitividade econômica e redução das emissões da siderurgia brasileira ao longo das próximas décadas.

## **5. CONCLUSÃO**

A descarbonização da siderurgia representa um dos principais desafios para a indústria nas próximas décadas, exigindo a adoção de novas tecnologias e fontes energéticas de baixa emissão de carbono. A análise realizada indica que não há uma solução única, sendo necessária uma transição gradual baseada na combinação de diferentes estratégias de mitigação, conforme apresentado na análise SWOT desenvolvida neste trabalho, que destaca tanto as forças e oportunidades do contexto brasileiro quanto suas limitações estruturais e tecnológicas.

No contexto brasileiro, a utilização da redução direta do minério de ferro por meio de uma mistura de gás natural e hidrogênio verde surge como a alternativa mais viável no curto e médio prazo, conciliando redução de emissões com viabilidade econômica. Paralelamente, a ampliação do uso de sucata metálica, dos fornos elétricos a arco abastecidos por eletricidade renovável e do carvão vegetal proveniente de florestas plantadas pode contribuir significativamente para diminuir a intensidade de carbono da siderurgia nacional.

Embora tecnologias como a eletrólise de óxidos fundidos (MOE) e a eletrólise de baixa temperatura (LTE) apresentem elevado potencial para eliminar as emissões associadas à produção do ferro, ambas ainda se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento e demonstração industrial, não sendo possível, até o momento, visualizar sua aplicação em larga escala com viabilidade técnica e econômica consolidada. Dessa forma, a rota HDRI-FEA baseada em hidrogênio verde desponta como a alternativa mais promissora para uma transição efetiva da siderurgia nas próximas décadas.

Além dos benefícios para a produção de aço, o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio verde possui potencial para impulsionar a descarbonização de diversos outros setores industriais. Entretanto, para que esse cenário se concretize, serão necessários investimentos contínuos em infraestrutura, pesquisa e inovação, além de políticas públicas que incentivem a produção nacional de baixo carbono, ampliem a oferta de energia renovável e promovam condições favoráveis à competitividade da indústria brasileira frente ao mercado internacional. Assim, o Brasil reúne condições para assumir posição de destaque na produção sustentável de aço, desde que aproveite suas vantagens competitivas e conduza de forma planejada a transição para tecnologias de menor emissão de carbono.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇO BRASIL. Instituto Aço Brasil. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br>. Acesso em: 19 abr. 2026.

APERAM. Aperam BioEnergia é referência global em sustentabilidade e alta performance na produção de carvão vegetal. 24 fev. 2023. Disponível em: [Aperam BioEnergia é referência global em sustentabilidade e alta performance na produção de carvão vegetal](#). Acesso em: 10 jun. 2026.

ARCELORMITTAL. Sucata metálica. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/sucata-metalica>. Acesso em: 21 abr. 2026a.

ARCELORMITTAL. XCarb®: towards net zero steel. Disponível em: <https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/climate/xcarb>. Acesso em: 10 jun. 2026b.

ArcelorMittal Newsroom. ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world's first industrial-scale low-temperature iron electrolysis plant. 2023. Acesso em: 7 jun. 2026b.

BAPTÍSTA, André Luís de Brito. Desenvolvimento de um briquete auto-fundente, multiconstituído de rejeitos, resíduos e descartes recicláveis gerados na planta integrada de produção de aço, aplicado como componente da carga de fornos de redução de ferro. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais). Centro Universitário de Volta Redonda, Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2016.

BEZERRA, F. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. Caderno Setorial ETENE, ano 6, n. 212, p. 1-13, 6 dez. 2021. Disponível em: [https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021\\_CDS\\_212.pdf](https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf). Acesso em: 21 jun. 2026.

BHASKAR, Abhinav; ASSADI, Mohsen; SOMEHSARAEI, Homam Nikpey. Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen. *Energies*, Basel, v. 13, n. 4, p. 758, 2020. DOI: 10.3390/en13040758.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. rev. São Paulo: ABM, 2008.

CIRINEU, Grace Regina Ferreira. "Aço verde": estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

COP30 BRASIL. COP30: negociações apresentam resultados emblemáticos em meio a tensões geopolíticas sem precedentes. Disponível em: <https://cop30.br/pt-br/noticias-da-cop30/cop30-negociacoes-apresentam-resultados-emblematicos-em-meio-a-tensoes-geopoliticas-sem-precedentes>. Acesso em: 21 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 21 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz energética e elétrica. Brasília: EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 4 jun. 2026.

ENGIE Brasil. Startup sueca mira no aço verde por meio de hidrogênio renovável. Além da Energia, 22 abr. 2024. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/startup-sueca-mira-no-aco-verde-por-meio-de-hidrogenio-renovavel/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

GERDAU. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br>. Acesso em: 21 abr. 2026a.

GERDAU. Gerdau presents a low-carbon steel solution to support customers in their decarbonization strategies. 9 abr. 2026. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/en/noticias/gerdau-presents-a-low-carbon-steel-solution-to-support-customers-in-their-decarbonization-strategies/>. Acesso em: 10 jun. 2026c.

GERDAU. Newave Energia e Gerdau inauguram Complexo Solar de Barro Alto, em Goiás, com investimento de R\$ 1,3 bilhão e capacidade para abastecer cidade de 350 mil habitantes. 19 mar. 2026. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/noticias/newave-energia-e-gerdau-inauguram-complexo-solar-de-barro-alto-em-goias-com-investimento-de-r-13-bilhao-e-capacidade-para-abastecer-cidade-de-350-mil-habitantes/>. Acesso em: 10 jun. 2026b.

GORDON, Oliver. Boston Metal bags \$120m to scale green steel technology. Energy Monitor, 8 fev. 2023. Disponível em: Energy Monitor - Boston Metal bags \$120m to scale green steel technology. Acesso em: 6 jun. 2026.

GRIFFIN, P. W.; HAMMOND, G. P. The prospects for 'green steel' making in a net-zero economy: a UK perspective.

HUMBERT, Matthew S.; BROOKS, Geoffrey A.; DUFFY, Alan R.; HARGRAVE, Chad; RHAMDHANI, M. Akbar. Economics of Electrowinning Iron from Ore for Green Steel Production. Journal of Sustainable Metallurgy, v. 10, p. 1679-1701, 2024. DOI: 10.1007/s40831-024-00878-3.

Hydrogen Insight. This new technology could kill the business case for hydrogen in green steel production. 27 maio 2024. Disponível em: Hydrogen Insight - This new technology could kill the business case for hydrogen in green steel production. Acesso em: 6 jun. 2026.

IACO. Stacker Reclaimer (Empilhadeira Recuperadora). Belo Horizonte: IACO. Disponível em: <https://iaco.com.br/operacao/stacker-reclaimer-empilhadeira-recuperadora/>. Acesso em: 23 maio 2026.

KOUTSOUPA, Sevasti et al. ΣIDERWIN—A New Route for Iron Production. In: International Conference on Raw Materials and Circular Economy. Athens, Greece, 2021.

LAMEIRINHAS, Roberto. Brasileiro lidera projeto de produção de aço com "emissão zero" de CO<sub>2</sub>. CNN Brasil, São Paulo, 6 maio 2021. Disponível em: CNN Brasil - Brasileiro lidera projeto de produção de aço com emissão zero de CO<sub>2</sub>. Acesso em: 6 jun. 2026.

LIMA, José Renato de Oliveira; SILVA, Marcia Delane; MEDEIRO, Mayrla Fernandes Farias; SANTOS, Ricardson Vieira dos. Descarbonização do setor da construção civil através do uso do hidrogênio verde na produção do aço. Revista SODEBRAS, v. 19, n. 222, set./dez. 2024.

LISIENKO, V. G. et al. Types of greenhouse gas emissions in the production of cast iron and steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 150, p. 012023, 2016.

MOORE, Patrick. Brasil vê oportunidade em aço verde, mas com entraves. Dialogue Earth, 2 jun. 2026. Disponível em: Dialogue Earth - Brasil vê oportunidade em aço verde, mas com entraves. Acesso em: 12 jun. 2026.

MOURÃO, Marcelo Breda et al. Introdução à siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007.

MUSLEMANI, Hasan; LIANG, Xi; KAESEHAGE, Katharina; ASCUI, Francisco; WILSON, Jeffrey. Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products. *Journal of Cleaner Production*, v. 315, art. 128127, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128127.

NOGUEIRA, Ítalo Martins; MADUREIRA, Moisés Teles. A indústria siderúrgica no Brasil. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, e300111638241, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38241>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 21 abr. 2026.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. Introdução aos processos de refino primário dos aços nos convertedores a oxigênio. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2006.

SALESFORCE BRASIL. Análise SWOT: o guia para fazê-la corretamente. 2023. Disponível em: <https://www.salesforce.com/br/blog/analise-swot/>. Acesso em: 12 jun. 2026.

SIDDIQUI, Md Irfanul Haque. Innovative green steelmaking process for sustainable steel production. *VW Applied Sciences*, 2023.

SILVA, Felipe Lima Fernandes da; SILVA, Henrique Eduardo Soares da; PEREIRA, Breno Silverio; RIBEIRO, Shimeni Baptista; RODRIGUES, Wictor Hugo do Vale. Processo e termodinâmica da redução a hidrogênio do minério de ferro. *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda, ed. 54, 2024.

SILVA, José Nazareno Santos. Siderurgia. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA); Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2011. 110 p.

STEEL ROCHA MINERAÇÃO. Hematita. Belo Horizonte, [s.d.]. Disponível em: <https://steelrochamineracao.com.br/hematita.php>. Acesso em: 4 jun. 2026.

STEGRA. Green platforms. Disponível em: <https://stegra.com/en/green-platforms>. Acesso em: 11 jun. 2026.

THANWISAI, Panya et al. Sustainable iron production via highly efficient low-temperature electrolysis of 3D conductive colloidal electrodes. *Green Chemistry*, v. 26, p. 9176-9185, 2024. DOI: 10.1039/D4GC00698D.

WESTIN, Ricardo. Afinal, o cultivo de eucalipto é mesmo prejudicial ao meio ambiente? Senado Notícias, Brasília, DF, 27 set. 2024. Disponível em: Senado Notícias. Acesso em: 10 jun. 2026.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Raw materials. Bruxelas, 2026. Disponível em: <https://worldsteel.org/other-topics/raw-materials/>. Acesso em: 10 jun. 2026.

WORLD STEEL ASSOCIATION. The Steel Story. Brussels: World Steel Association, 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/media/publications/steel-story/>. Acesso em: 7 abr. 2026.

ZHANG, Y.-J.; CHANDIRAN, E.; DONG, H.-K.; KAMIKAWA, N.; MIYAMOTO, G.; FURUHARA, T. Current understanding of microstructure and properties of micro-alloyed low carbon steels strengthened by interphase precipitation of nano-sized alloy carbides: a review. *JOM*, v. 73, p. 3214-3227, 2021.