



Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Civil
Mestrado em Engenharia Civil - Construções Cíveis

TRANSFORMAÇÃO VERDE: O IMPACTO DO
GREEN STEEL NA SUSTENTABILIDADE DA
CONSTRUÇÃO CIVIL

ESTUDANTE BRUNA SOUZA SILVA

Leiria, 29 de setembro de 2024



Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Civil
Mestrado em Engenharia Civil - Construções Cíveis

TRANSFORMAÇÃO VERDE: O IMPACTO DO
GREEN STEEL NA SUSTENTABILIDADE DA
CONSTRUÇÃO CIVIL

ESTUDANTE BRUNA SOUZA SILVA
Número: 2190222

Dissertação realizada sob orientação do Professor Doutor Luís Prola (luis.prola@ipleiria.pt).

Leiria, 29 de setembro de 2024

DECLARAÇÃO

Declaro, sob compromisso de honra, que o trabalho apresentado nesta dissertação, com o título “*Transformação Verde: O Impacto do Green Steel na Sustentabilidade da Construção Civil*”, é original e foi realizado por Bruna Souza Silva (número 2190222) sob orientação de Professor Doutor Luís Prola (luis.prola@ipleiria.pt).

Todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar foram devidamente citados. Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Construções Cíveis no ano letivo 2023/2024 da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visam a avaliação destes trabalhos.

Leiria, 29 de setembro de 2024



Estudante Bruna Souza Silva

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e inspiração ao longo de todo este percurso. Sem Sua presença constante na minha vida, os desafios teriam sido muito mais difíceis de enfrentar. Sou grata por cada momento de superação e crescimento proporcionado por Sua graça.

Aos meus pais, dedico todo o meu carinho e gratidão. Sempre foram meu suporte incondicional, encorajando-me e acreditando em mim, mesmo nas horas mais difíceis. O amor, os ensinamentos e o vosso apoio foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Este trabalho é fruto do esforço e dos valores que vocês me transmitiram ao longo da vida.

Aos meus amigos, quero expressar a minha sincera gratidão por estarem ao meu lado em cada etapa desta jornada. Pelas palavras de incentivo, pelas risadas que aliviaram o “stress” e pelo ombro amigo nas horas mais difíceis, sou eternamente grata. A companhia e o vosso apoio fizeram toda a diferença.

Ao meu professor e orientador, Prola, a minha imensa gratidão por sua paciência, dedicação e orientação durante todo este processo. A sua sabedoria, conselhos e críticas construtivas foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por acreditar no meu potencial e por estar sempre disponível para me guiar com clareza e incentivo.

A todos, o meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

O presente trabalho aborda a temática da sustentabilidade na construção civil, com foco na análise do impacto do Green Steel, ou aço verde, nesse contexto. A crescente preocupação ambiental e a necessidade de redução dos impactos negativos da construção civil sobre o ambiente têm impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis na escolha de materiais de construção. Nesse sentido, o Green Steel surge como uma opção promissora, caracterizada pelo uso de aço reciclado ou produzido por processos mais limpos e eficientes, mantendo as suas propriedades mecânicas de resistência e rigidez.

Ao rever a literatura existente, são explorados neste trabalho os avanços tecnológicos, os benefícios ambientais e económicos, bem como as limitações e oportunidades associadas ao uso do Green Steel. A análise crítica dos estudos selecionados permite uma compreensão mais profunda do potencial transformador desse material na indústria da construção civil.

Pode-se dizer que o Green Steel possui um papel muito importante na promoção da sustentabilidade na construção civil, oferecendo uma alternativa viável e eficaz para reduzir os impactos ambientais do setor. No entanto, são identificadas também algumas questões pendentes, como desafios tecnológicos, económicos e regulatórios, que requerem uma abordagem integrada e colaborativa por parte dos diversos atores envolvidos na cadeia de suprimentos da construção civil.

Devido ao fato do assunto ser muito recente (ainda estar em desenvolvimento) com aplicação vasta na indústria automóvel, pouco se tem publicado sobre os efeitos na construção civil. Sensibilizar para o uso do aço verde na edificação é objetivo do presente trabalho.

Palavras-chave: Descarbonização do aço, Green Steel, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This paper addresses the theme of sustainability in civil construction, focusing on the analysis of the impact of Green Steel in this context. The growing environmental concern and the need to reduce the negative impacts of civil construction on the environment have driven the search for more sustainable alternatives in the choice of building materials. In this regard, Green Steel emerges as a promising option, characterized by the use of recycled steel or steel produced through cleaner and more efficient processes, while maintaining its mechanical properties of strength and durability.

By reviewing existing literature, this paper explores technological advancements, environmental and economic benefits, as well as the limitations and opportunities associated with the use of Green Steel. The critical analysis of selected studies provides a deeper understanding of this material's transformative potential in the construction industry.

It can be said that Green Steel plays a vital role in promoting sustainability in civil construction, offering a viable and effective alternative to reduce the sector's environmental impacts. However, some pending issues are also presented, such as technological, economic, and regulatory challenges, which require an integrated and collaborative approach from various stakeholders involved in the civil construction supply chain.

Given that the subject is quite recent (still under development) with vast application in the automotive industry, little has been published about its effects on civil construction. The goal of this paper is to raise awareness of the use of green steel in building construction.

Keywords: Green Steel, Steel Decarbonization, Sustainability.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| Declaração | i |
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | v |
| Abstract | vii |
| Índice | ix |
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de Abreviaturas | xiii |
| | |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 1 |
| 1.2 Estrutura | 1 |
| 1.3 Contextualização | 1 |
| | |
| 2 Fundamentação Teórica | 5 |
| 2.1 Emissões de GEE e Consumo de Energia no Setor de Aço | 5 |
| 2.2 Descarbonização do Aço na União Europeia | 6 |
| | |
| 3 Aço Verde | 9 |
| 3.1 Produção do <i>Aço Verde</i> | 11 |
| 3.2 Aço Verde no Setor da Construção Civil | 26 |
| 3.3 Vantagens e Desvantagem do Aço Verde | 29 |
| 3.4 Perspetivas do Aço Verde | 31 |
| 3.5 Ciclo de Vida | 32 |
| 3.5.1 Emissões Indiretas do Uso de Eletricidade | 34 |
| 3.5.2 Emissões do Aço Reciclado e Benefícios do CCU | 34 |
| | |
| 4 Desafios da Sustentabilidade e o Aço Verde | 37 |
| 4.1 Alterações Climáticas | 38 |
| 4.2 Descarbonização do Setor Siderúrgico | 41 |
| 4.3 O Desafio dos Custos na Produção Sustentável de Aço Verde | 42 |
| 4.4 Concorrência | 45 |
| 4.5 Estratégia para Aumentar a Procura do Aço Verde | 46 |

ÍNDICE

| | | |
|---|--------------|----|
| 5 | Conclusões | 49 |
| | Bibliografia | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Fluxo gasoso durante a operação de alto-forno | 6 |
| Figura 2 | Produção de aço por Estado-Membro em 2020. | 7 |
| Figura 3 | Consumo de aço na UE e nos EUA, dividido por setor e as suas respetivas quotas na procura global. | 10 |
| Figura 4 | Emissões de CO ₂ das indústrias pesadas que podem ser reduzidas com práticas verdes, como a produção de aço verde. | 12 |
| Figura 5 | Produção de hidrogénio verde. | 14 |
| Figura 6 | Comparação da produção de aço convencional e aço verde. | 17 |
| Figura 7 | Localização da empresa H2 Green Steel. | 18 |
| Figura 8 | Produção do aço verde. | 18 |
| Figura 9 | Bobinas de rolo quente. | 19 |
| Figura 10 | Unidades de eletrólise na sede da empresa Boston Metal. | 22 |
| Figura 11 | A geração, armazenamento e perigos de lamas vermelhas e solução com tratamento com plasma de hidrogénio. | 25 |
| Figura 12 | Construções em aço. | 28 |
| Figura 13 | Conexão entre a produção primária e secundária de aço. | 33 |
| Figura 14 | Procura e intensidade energética de aço entre 2000 e 2018. | 39 |
| Figura 15 | Trajetória das emissões de CO ₂ do aço. | 40 |
| Figura 16 | A indústria siderúrgica exigirá novas tecnologias para atingir metas climáticas ambiciosas. | 42 |
| Figura 17 | Percentagem da produção de aço em alguns países. | 45 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|--|
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida. |
| AIE | Agência Internacional de Energia. |
| BF | Alto-forno. |
| BOF | Forno Básico a Oxigênio. |
| CCS | Captura e Armazenamento de Carvão. |
| CCU | Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono. |
| CFCs | Clorofluorcarbonos. |
| CH ₄ | Metano. |
| CO | Monóxido de Carbono. |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono. |
| COP26 | Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática. |
| DR | Reator de Indução Direta. |
| DRI | Ferro Reduzido Diretamente. |
| EAF | Fornos Elétricos a Arco. |
| EUA | Estados Unidos. |
| GEE | Gases de Efeito Estufa. |
| H ₂ | Hidrogênio. |
| H-DR | Hidrogênio Reduzido Diretamente. |
| HYBRIT | <i>Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology.</i> |

Lista de Abreviaturas

| | |
|------------------|--|
| IA | Inteligência Artificial. |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida. |
| IPCC | Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. |
| MOE | Eletrólise de Óxido Fundido. |
| N ₂ O | Óxido Nitroso. |
| O ₃ | Ozono. |
| OMM | Organização Meteorológica Mundial. |
| ppm | Partes por Milhão. |
| RH | Refino a Vácuo. |
| SO _x | Óxidos de Enxofre. |
| UE | União Europeia. |
| USMCA | Acordo Estados Unidos-México-Canadá. |
| WTP | <i>Willingness To Pay.</i> |

INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo explorar o potencial do Aço Verde como uma solução eficaz para reduzir os impactos ambientais causados pelo setor da construção civil. Pretende-se abordar esta temática em diferentes secções, a começar por uma revisão da literatura sobre o desenvolvimento e uso do Aço Verde, seguida da implementação do aço verde na construção civil e por último a sustentabilidade do mesmo.

1.2 ESTRUTURA

A presente dissertação está estruturada em 4 capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma contextualização do assunto, estabelecem-se os objetivos e a estrutura do documento, já no Capítulo 2 faz-se uma introdução ao tema. O conceito de Green Steel (aço verde) e a sua aplicação são apresentados a seguir, no Capítulo 3. A seguir, no Capítulo 4 o tema em discussão são os desafios da sustentabilidade do aço verde, seguindo-se para as conclusões finais, no Capítulo 5.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor siderúrgico desempenha um papel vital na economia global, fornecendo os materiais fundamentais para uma ampla gama de indústrias, desde a construção civil até a fabricação de automóveis. No entanto, a sua relevância económica é acompanhada por um alto custo ambiental devido às emissões significativas de gases de efeito estufa. A produção de aço é altamente intensiva em energia e depende fortemente do uso de combustíveis fósseis, resultando em emissões substanciais de CO₂ (Quader et al., 2015).

Essas emissões representam uma parte considerável das emissões totais de **CO2** em escala global, contribuindo para os desafios enfrentados na mitigação das mudanças climáticas. Com a previsão de um aumento contínuo no consumo de aço, especialmente em economias em desenvolvimento, a descarbonização da indústria siderúrgica é uma prioridade urgente para alcançar as metas de redução de emissões estabelecidas em acordos internacionais, como o Acordo de Paris (Li e Zhu, 2014). No entanto, a transição para práticas de produção de aço mais sustentável enfrenta uma série de desafios tecnológicos, económicos e políticos. Embora existam tecnologias promissoras em desenvolvimento, como a captura e armazenamento de carbono e o uso de energia renovável na produção de aço, a sua implementação em escala comercial ainda enfrenta obstáculos significativos.

Portanto, compreender a complexidade e os desafios associados à descarbonização do setor siderúrgico é essencial para orientar políticas e práticas que promovam uma transição eficaz para um futuro mais sustentável. Este contexto destaca a importância de investigação e iniciativas que busquem soluções inovadoras e viáveis para reduzir as emissões de **CO2** na produção de aço, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas e a construção de uma economia mais verde e resiliente (Li e Zhu, 2014).

Estudos recentes têm se dedicado a investigar o potencial de redução das emissões de **CO2** no setor siderúrgico. No entanto, as descobertas sugerem que as medidas tradicionais de eficiência energética são limitadas e podem reduzir coletivamente apenas cerca de 25% a 40% das emissões médias de **CO2** por tonelada de aço bruto produzido. Para alcançar reduções mais expressivas, são necessárias tecnologias inovadoras (Leeson et al., 2017).

A introdução de tecnologias inovadoras no setor siderúrgico tem o potencial de diminuir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e remodelar o cenário tecnológico da indústria. Essas mudanças, se implementadas precocemente, podem contribuir para a mitigação dos custos mais elevados associados à ação climática a longo prazo. No entanto, apesar do potencial dessas tecnologias, a experiência prática com a sua aplicação é limitada, e a falta de modelos de negócios estabelecidos dificulta a sua viabilidade comercial (Leeson et al., 2017).

Uma possível abordagem de longo prazo para comercializar essas tecnologias é estabelecer um mercado de aço “verde”, produzido por processos de fabricação com menor intensidade de emissões de gases de efeito estufa (Muslemani et al., 2021). Isso poderia promover uma trajetória de produção mais limpa para a indústria siderúrgica e incentivar a sua descarbonização ao longo do tempo. Contudo, é

importante estabelecer uma distinção clara entre produtos de aço que apresentam menor emissão de carbono devido a diferentes processos de produção e produtos de “aço de baixo carbono”, que possuem um teor mínimo de carbono em si mesmos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EMISSÕES DE GEE E CONSUMO DE ENERGIA NO SETOR DE AÇO

Gases de Efeito Estufa (GEE) são chamados assim porque causam um aquecimento análogo ao observado em estufa de plantas. Na estufa, a radiação solar, que tem alta energia, passa pelo vidro e fica presa na forma de calor. Algo parecido acontece na Terra: a energia do sol passa pela atmosfera, parte dela é absorvida pela superfície do planeta e outra parte é emitida de volta ao espaço. Porém, uma fração dessa energia fica presa pelos gases na atmosfera, o que causando um aumento na temperatura média do planeta. Esse fenômeno é natural e essencial para a vida, mas o aumento das emissões de **GEE**, como **CO₂**, **CH₄**, **N₂O**, **O₃**, **CFCs** e vapor de água, está a causar um aquecimento maior, de acordo com alguns estudos (Lisienko et al., 2016).

A indústria siderúrgica é responsável pela emissão de volumes significativos de gases de efeito estufa, predominantemente dióxido de carbono. O metano, outro **GEE** relevante, é utilizado como fonte energética no setor industrial e subsequentemente convertido em **CO₂**. No contexto da produção de aço, a pegada de carbono pode ser conceituada como a totalidade das emissões de **CO₂**, abrangendo todas as etapas do processo produtivo, desde a extração das matérias-primas até a finalização do produto (Lisienko et al., 2016).

No alto-forno, a composição gasosa típica apresenta uma concentração de **CO** entre 25–27% e de **CO₂** entre 16-23%, variando em função da quantidade de oxigênio empregada na combustão. As emissões de **CO₂** resultantes deste processo são classificadas como emissões diretas. Uma fração do **CO** é reutilizada nos processos internos do alto-forno, transformando-se em **CO₂** nos aquecedores de combustão. Contudo, a maior parte é direcionada para combustão nas caldeiras das fábricas, gerando **CO₂** que é categorizado como emissão indireta (Lisienko et al., 2016).

A Figura 1 mostra um diagrama que descreve as fontes de emissões de **CO₂** e **CO** no processo de produção de aço num alto-forno. Como referido acima, as emissões diretas de **CO₂** no alto-forno variam de 16 a 23%, enquanto as emissões diretas de **CO** são de 25 a 27%. As emissões de **CO₂** também ocorrem em outras partes do

processo, como nos aquecedores, no forno de reaquecimento, na usina local e na bateria de coque. As emissões indiretas de CO_2 no alto-forno estão ligadas ao uso de coque e gás natural como fontes de energia. A imagem destaca a complexidade das emissões ao longo do processo de produção de aço, incluindo diversas fontes que contribuem para o impacto ambiental.

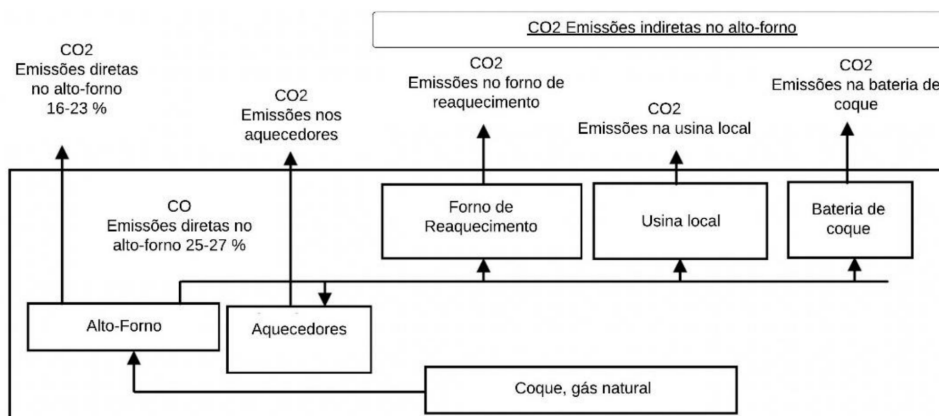


Figura 1: Fluxo gasoso durante a operação de alto-forno. Retirado de Lisienko et al., 2016.

O setor de aço é o segundo maior consumidor de energia na indústria. O combustível mais utilizado é o carvão, que representa 74% do consumo energético do setor siderúrgico mundial. Além do carvão, a eletricidade e o gás natural representam praticamente o restante das necessidades energéticas. O coque de carvão, utilizado na fabricação do aço, é responsável por 16% do consumo mundial de carvão (International Energy Agency, 2020). A indústria do aço precisa reduzir as suas emissões em 50% até 2050 para cumprir o Acordo de Paris e alcançar as metas de emissões zero até 2070. Esse desafio é agravado pelo aumento do consumo de aço devido ao crescimento populacional e económico. Se não forem tomadas medidas para melhorar os processos de produção, espera-se que as emissões futuras do setor aumentem, atingindo 2,7 bilhões de toneladas de CO_2 por ano em 2050, o que representa um aumento de 7% em relação a 2019 (International Energy Agency, 2020).

2.2 DESCARBONIZAÇÃO DO AÇO NA UNIÃO EUROPEIA

O aço é uma das principais indústrias da economia europeia, desempenhando um papel crucial em setores como construção, transporte e energia. No entanto, a produção de aço na União Europeia (UE) também é uma das maiores fontes de emissão de CO_2 , responsável por cerca de 5% das emissões totais de gases de efeito

estufa da região. Essa realidade coloca a indústria siderúrgica numa encruzilhada: enquanto o aço é fundamental para a economia, é imperativo que as suas práticas de produção sejam reformuladas para atender às metas ambientais estabelecidas pela UE para 2030 e 2050 (Somers, 2022).

De acordo com a Figura 2, em 2020, a Alemanha destacou-se como o maior produtor, responsável por 26% da produção total de aço da UE. Na sequência, encontra-se a Itália, com 15%, e a França e a Espanha, ambas com 8%. Esta distribuição revela a importância estratégica da indústria siderúrgica na economia destes países, além de sublinhar a necessidade de uma abordagem colaborativa para promover inovações e práticas sustentáveis no setor (Somers, 2022).

Os métodos de produção de aço na UE variam amplamente entre os Estados-Membros. No ano de 2020, mais da metade do aço foi gerado pela rota primária, utilizando altos-fornos, enquanto 44% resultaram de processos de reciclagem. Na Alemanha, a predominância da rota primária é evidente, com 68% do aço produzido em altos-fornos. Em contrapartida, a Itália apresenta um panorama diferente, onde 85% do aço é fabricado em instalações de pequena escala equipadas com fornos **Fornos Elétricos a Arco (EAF)**. Esta diversificação nos métodos de produção não só reflete a disponibilidade de recursos e tecnologia, mas também a resposta às crescentes exigências por práticas mais sustentáveis e com menor impacto ambiental (Somers, 2022).

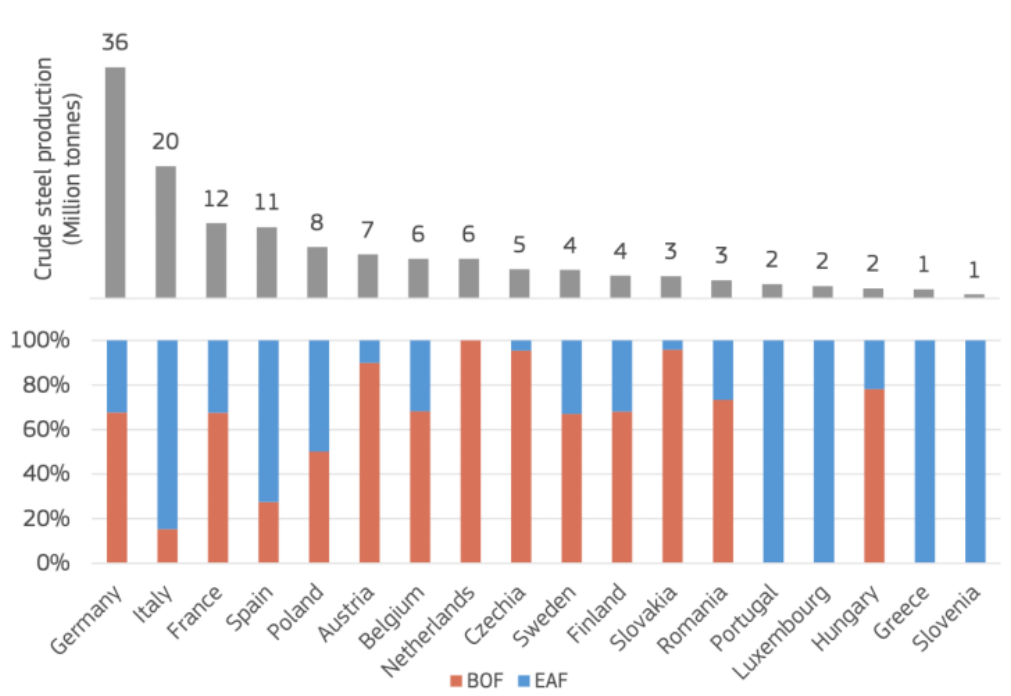


Figura 2: Produção de aço por Estado-Membro em 2020. Retirado de Somers, 2022

A maior parte do aço na UE é produzida por meio do processo de altos-fornos (BF-BOF), que utiliza carvão como fonte de energia e agente redutor para transformar minério de ferro em aço. Este método, amplamente utilizado, gera emissões significativas de CO₂, tornando-se um dos principais desafios para a descarbonização do setor. Aproximadamente 60% do aço europeu é produzido por esse processo, enquanto os restantes 40% vêm de EAF, que reciclam sucata de aço, emitindo apenas uma fração do carbono produzido pelos altos-fornos (Somers, 2022).

Para atingir as metas climáticas da UE, é necessária uma transformação radical nos processos produtivos. Apesar de as siderúrgicas europeias estarem entre as mais eficientes do mundo, com processos otimizados, as reduções adicionais de CO₂ só podem ser alcançadas com novas tecnologias e abordagens inovadoras (Somers, 2022).

As políticas da UE estão agora mais direcionadas à descarbonização da indústria siderúrgica, principalmente por meio de iniciativas como o Pacto Ecológico Europeu e os compromissos com a neutralidade climática até 2050. As indústrias que não se adaptarem a essa nova realidade correm o risco de se tornarem obsoletas num mercado global cada vez mais competitivo.

O Pacto Ecológico Europeu (ou European Green Deal) é como uma política central da União Europeia para a transição rumo à neutralidade climática até 2050. Esse acordo coloca a descarbonização da indústria siderúrgica como uma prioridade, devido às suas emissões intensivas de CO₂. A implementação dessas metas exige a transformação de setores intensivos em carbono, como a siderurgia. Entre as iniciativas políticas de apoio estão o pacote *Fit for 55*, que inclui a revisão do sistema de comércio de emissões da UE, e o financiamento de inovações tecnológicas que visam o desenvolvimento de tecnologias de produção de aço com baixas emissões de CO₂ (Somers, 2022).

O Pacote *Fit for 55* é uma série de medidas legislativas propostas pela União Europeia para ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990. Este pacote é um dos principais mecanismos de suporte às metas climáticas da UE, tanto para o médio quanto para o longo prazo, em direção à neutralidade de carbono até 2050. Ele é composto por diversas iniciativas, incluindo a revisão do Sistema de Comércio de Emissões da UE, que regula as emissões de indústrias como a siderurgia, aumentando a meta de redução de emissões para esses setores em 61% até 2030, em comparação aos níveis de 2005 (Somers, 2022).

AÇO VERDE

O aço é fundamental para a construção moderna, com uma produção anual de 1,8 mil milhões de toneladas, representando 90% de todo o metal produzido no mundo. Este material é essencial não apenas para a construção civil, mas também para tecnologias de energia sustentável, como turbinas eólicas e veículos elétricos, que são vitais para a transição energética global (McAdam e Brown, 2001).

Apesar da sua importância, a produção tradicional de aço é uma das maiores fontes de emissões de **Gases de Efeito Estufa (GEE)**. A fabricação de aço é responsável por 7% das emissões globais do setor energético. Este processo de produção envolve etapas que necessitam de temperaturas extremamente elevadas, o que torna a tarefa de reduzir essas emissões um grande desafio comparativamente a outros setores (McAdam e Brown, 2001).

A Figura 3 apresenta dados sobre o consumo de aço no mundo, comparando a **UE**, os **EUA** e o consumo global em 2018 e 2019. Os gráficos circulares mostram a distribuição do consumo por setores, como construção, automóvel, maquinaria, metalurgia e energia. Na **UE**, o setor da construção lidera com 36%, enquanto nos **EUA** é responsável por 44% do consumo. A imagem também destaca o uso de fornos de arco elétrico (40% na **UE** e 65% nos **EUA**). No gráfico de barras, observa-se que o consumo global totalizou 1.768 milhões de toneladas, com a China a liderar, com 908 milhões de toneladas, seguida pela **UE** (159) e **EUA** (98).

A descarbonização da produção de aço é complexa devido à natureza dos processos envolvidos, que requerem muito calor e energia. Para reduzir as emissões de **GEE** associadas à produção de aço, é necessário desenvolver e implementar tecnologias inovadoras que possam operar de forma eficiente com menor impacto ambiental. Isto é crucial para alcançar metas globais de redução de emissões e combater as alterações climáticas, garantindo, simultaneamente, a continuidade do fornecimento de aço para infraestruturas e tecnologias essenciais (Ellerbeck, 2022).

A crescente consciencialização ambiental tem impulsionado a adoção do aço verde, dadas as suas características que minimizam o desperdício de recursos naturais, a emissão de gases poluentes e a degradação do meio ambiente.

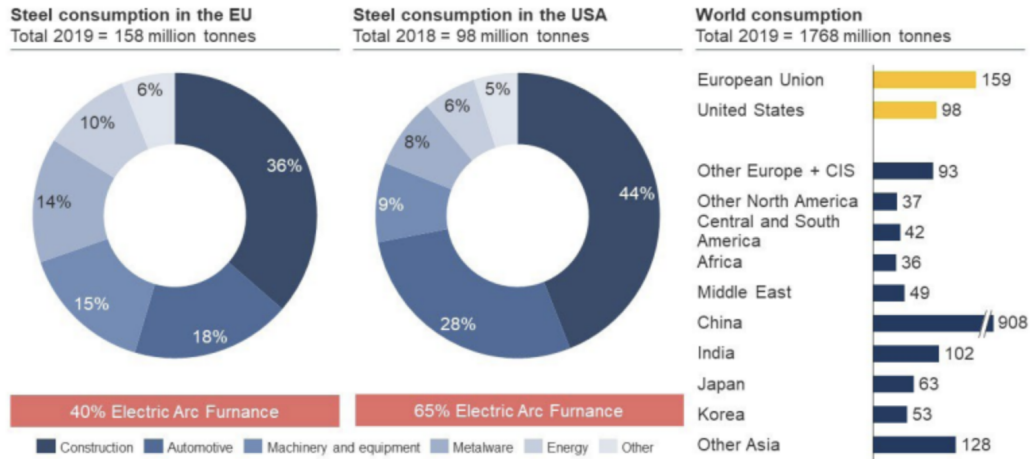


Figura 3: Consumo de aço na UE e nos EUA, dividido por setor e as suas respetivas quotas na procura global. Retirado do relatório WEF (Ellerbeck, 2022).

Ao contrário de outros materiais convencionais, como o betão e o alumínio, o aço verde destaca-se pela sua menor pegada de carbono e a sua capacidade de reciclagem, o que o torna uma opção viável para mitigar os problemas ambientais associados à construção civil (Ellerbeck, 2022).

O termo *aço verde* surgiu no cenário industrial há aproximadamente uma década ou mais, e refere-se a um método de fabrico de aço concebido para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, oferecendo simultaneamente potencial para redução de custos e melhoria da qualidade do produto final em comparação com os métodos tradicionais de produção (Ellerbeck, 2022).

Ademais, a maioria das nações industrializadas reconhece a importância do combate às alterações climáticas e da redução das emissões de CO₂ como prioridade máxima nos debates globais (McAdam e Brown, 2001). Este reconhecimento reflete a crescente consciencialização sobre os desafios ambientais e a necessidade urgente de adotar práticas sustentáveis na indústria. Assim, o conceito de *aço verde* assume uma relevância ainda maior, uma vez que se apresenta como uma solução potencial para mitigar os impactos negativos da construção civil no ambiente e contribuir para a construção de um futuro mais sustentável.

Deste modo, o conceito de *aço verde* surgiu como uma alternativa sustentável e inovadora. Originado da necessidade de reduzir os impactos ambientais associados à produção e uso de materiais de construção tradicionais, representa uma abordagem mais consciente e responsável para atender às exigências estruturais das edificações. A sua utilização abrange uma variedade de aplicações, desde estruturas de edifícios

comerciais até pontes e viadutos, destacando-se pela sua resistência, durabilidade e versatilidade (Ellerbeck, 2022).

O uso do aço verde na construção civil representa um avanço significativo em direção à sustentabilidade e à responsabilidade ambiental dentro do setor. Este material, derivado em grande parte de aços reciclados ou produzidos com processos mais limpos e eficientes, tem ganho destaque em obras em todo o mundo devido às suas características ambientais positivas e à sua eficácia estrutural.

Produzir *aço verde* segue uma abordagem semelhante à produção de energia renovável ou à obtenção de madeira com certificação ambiental, onde além da funcionalidade, considera-se o impacto ambiental do produto ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração de matéria-prima até à utilização final. Esta abordagem visa aprimorar a sustentabilidade do processo de fabrico, promovendo práticas mais amigas do ambiente e atendendo às crescentes exigências de responsabilidade ambiental na produção industrial (Ellerbeck, 2022).

A siderurgia é um processo industrial crucial que desempenha um papel vital no desenvolvimento das sociedades modernas. O aço, devido à sua resistência, versatilidade e durabilidade excepcionais, tornou-se um material essencial em diversos setores, como construção civil, indústria automóvel, manufatura e infraestrutura. O processo siderúrgico envolve uma série de etapas fundamentais que transformam matérias-primas em aço de alta qualidade (Ellerbeck, 2022).

3.1 PRODUÇÃO DO AÇO VERDE

Como foi referido anteriormente, a produção de aço tem um impacto significativo nas emissões de GEE, sendo responsável por uma parcela considerável das emissões industriais na Europa. A necessidade de descarbonização nesse setor é crucial, e a adoção de tecnologias disruptivas parece ser uma abordagem promissora para alcançar esse objetivo.

O conceito de produção de *aço verde*, que envolve a utilização de processos de produção mais sustentáveis e energeticamente eficientes, parece ser uma solução viável para reduzir as emissões de CO₂ associadas à indústria siderúrgica. É importante ser um processo de produção totalmente integrado, aliado à digitalização e ao uso de fontes de energia renovável, como a eletricidade proveniente de fontes livres de fósseis e o hidrogénio verde (Souza Oliveira e Silva, 2022).

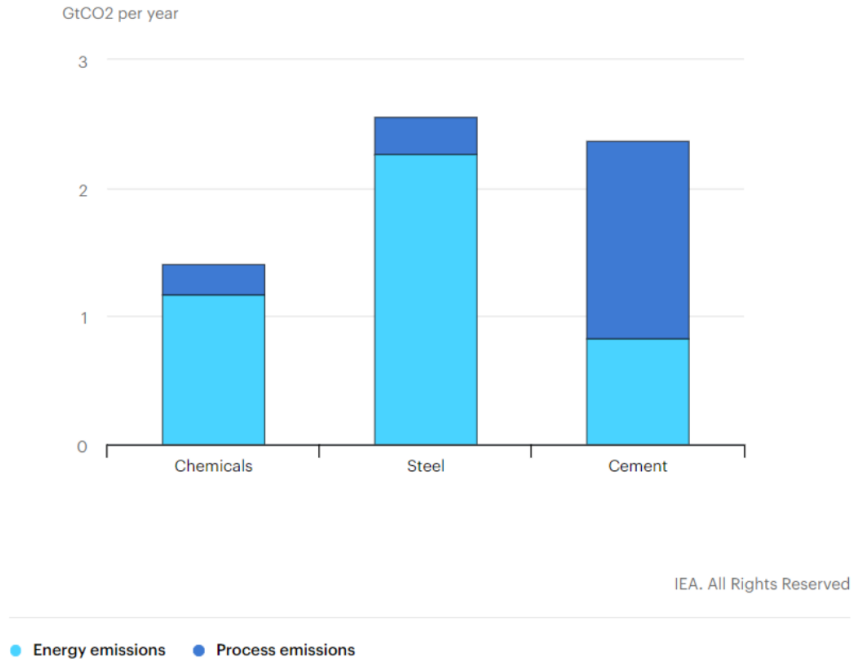


Figura 4: Emissões de CO₂ das indústrias pesadas que podem ser reduzidas com práticas verdes, como a produção de aço verde. Retirado de Ellerbeck, 2022.

Esta abordagem indica um compromisso com a inovação e a adoção de práticas mais sustentáveis na produção de aço. A substituição do carvão por fontes de energia mais limpas, como o hidrogénio verde, representa uma mudança significativa no paradigma da indústria siderúrgica tradicional, mostrando uma orientação em direção a um futuro mais sustentável e de baixo carbono.

No entanto, é importante considerar os desafios e as complexidades associados à implementação dessas tecnologias disruptivas. A transição para a produção de *aço verde* exigirá investimentos significativos em infraestrutura, investigação e desenvolvimento, além de mudanças nos processos e na cultura organizacional das empresas do setor siderúrgico. Além disso, questões relacionadas à disponibilidade de recursos, viabilidade económica e aceitação do mercado também precisam ser abordadas para garantir o sucesso desta transição (Ellerbeck, 2022).

A Figura 4 ilustra as emissões anuais de CO₂, em gigatoneladas (GtCO₂), de três setores industriais: Produtos Químicos, Aço e Cimento. Cada barra está dividida em emissões de energia (azul-claro) e emissões de processo (azul-escuro). O setor de aço apresenta as maiores emissões, com cerca de 2,8 GtCO₂/ano, sendo a maior parte proveniente do uso de energia. A figura enfatiza a importância do aço e do cimento como grandes emissores de carbono.

A **Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCU)** é outra tecnologia crucial na produção de aço verde. **CCU** envolve a captura das emissões de **CO₂** dos processos siderúrgicos, armazenando-as permanentemente ou reutilizando-as para outros fins. A captura do **CO₂** evita que ele seja liberto na atmosfera, reduzindo a pegada de carbono da indústria. O **CO₂** capturado pode ser armazenado em formações geológicas subterrâneas ou reaproveitado para melhorar a extração de petróleo ou para a produção de produtos valiosos. As tecnologias de **CCU** são essenciais para alcançar a neutralidade de carbono na indústria siderúrgica e facilitar a transição para um futuro mais sustentável (Souza Oliveira e Silva, 2022).

A produção de aço no processo siderúrgico envolve várias etapas: preparação, redução, refino e laminação. A etapa de redução consiste na remoção do oxigênio presente no aço, utilizando coque no alto-forno para converter o minério de ferro em ferro-gusa. Este processo é responsável por 90% das emissões de **CO₂** de toda a indústria siderúrgica. A reação que ocorre envolve o óxido de ferro e o monóxido de carbono, formando aço metálico e dióxido de carbono (Souza Oliveira e Silva, 2022).

Na redução direta do minério de ferro, este é transformado em ferro metálico sem passar pela fase líquida, sendo geralmente utilizado gás natural como agente redutor. Já no **Hidrogênio Reduzido Diretamente (H-DR)**, este é utilizado como agente redutor. Esta tecnologia é considerada uma das mais promissoras para a siderurgia, mas para que a produção seja de zero emissões de carbono, o hidrogênio usado deve ser gerado por eletrólise da água, utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis.

O hidrogênio tem um elevado potencial energético e pode ser utilizado como matéria-prima em diversas indústrias. Atualmente, grande parte do hidrogênio produzido provém de fontes fósseis, sendo que apenas cerca de 4% é obtido através da eletrólise da água. A eletrólise é o processo que separa a água em oxigênio e hidrogênio através da passagem de uma corrente elétrica (Souza Oliveira e Silva, 2022).

Quando o hidrogênio é utilizado como agente redutor, consegue-se uma maior eficiência na redução do minério de ferro, embora esta reação seja termicamente menos favorável em comparação com o uso de gás natural, devido à sua natureza endotérmica. Na siderurgia convencional, o carvão coque é usado para reduzir o minério de ferro, com o oxigênio a reagir com o carbono para formar **CO₂**. No entanto, na **Hidrogênio Reduzido Diretamente (H-DR)**, o oxigênio reage para formar água, substituindo o uso do coque e reduzindo substancialmente as emissões de

CO₂, podendo evitar-se até 91% das emissões diretas de CO₂ (Souza Oliveira e Silva, 2022).

A Figura 5 mostra o processo de produção de hidrogénio verde, no qual a eletricidade proveniente de fontes renováveis é utilizada para a eletrólise da água e, posteriormente, o hidrogénio gerado é usado na indústria siderúrgica. Um dos maiores desafios para a implementação desta tecnologia é o custo elevado do hidrogénio produzido por eletrólise, comparado com o obtido de fontes fósseis, devido ao preço da eletricidade e dos equipamentos de eletrólise. Além disso, a produção de aço verde exigiria grandes quantidades de energia de fontes renováveis (como eólica, solar, hídrica e biomassa), devido à dimensão do setor siderúrgico (H2FUTURE Green Hydrogen, 2024).

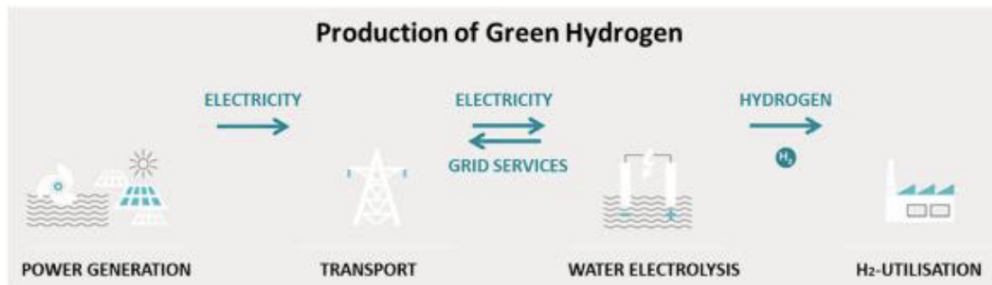


Figura 5: Produção de hidrogénio verde. Retirado de H2FUTURE Green Hydrogen, 2024.

A siderurgia verde adota os princípios da economia circular ao incentivar a reciclagem e reutilização de materiais. O aço é altamente reciclável, e o uso de sucata reciclada no processo de produção reduz significativamente o consumo de energia e a extração de matérias-primas. Através da coleta, classificação e processamento eficientes da sucata de aço, a indústria pode minimizar a geração de resíduos e conservar os recursos naturais. Além disso, subprodutos e resíduos da produção de aço, como escória e lama, podem ser aproveitados em diversas aplicações, incluindo materiais de construção e produção de cimento, reduzindo ainda mais o impacto ambiental (Rizzo, 2006).

O processo siderúrgico inicia-se com a seleção e preparação das matérias-primas. Os principais insumos incluem minério de ferro, carvão e calcário. O minério de ferro é a principal fonte de ferro, enquanto o carvão fornece o carbono necessário para a produção do aço. O calcário atua como fundente, ajudando na remoção de impurezas durante o processo. Essas matérias-primas são cuidadosamente selecionadas e misturadas para alcançar a composição química desejada no produto final de aço. A fabricação do ferro, a primeira etapa da produção do aço, envolve a conversão do minério de ferro em ferro fundido.

Isso normalmente é alcançado através de dois processos principais: o processo do alto-forno e o processo de redução direta. No processo do alto-forno, o minério de ferro, o coque (derivado do carvão) e o calcário são inseridos num forno, onde o calor intenso e os agentes redutores transformam o minério de ferro em ferro líquido. Por outro lado, o processo de redução direta utiliza gás natural ou outros agentes redutores para extrair o ferro do minério de ferro sem a necessidade de coque. Uma vez obtido o ferro fundido, ele é processado para remover impurezas e ajustar a sua composição, criando assim o aço (Rizzo, 2006).

A etapa final do processo de fabricação do aço envolve diversos tratamentos de acabamento para melhorar as propriedades do aço e atender aos requisitos específicos dos clientes. Esses tratamentos incluem tratamento térmico, laminação, forjamento, revestimento e acabamento de superfície. Processos de tratamento térmico, como têmpera e revenimento, podem aumentar a dureza, resistência e ductilidade do aço. As operações de laminação, forjamento e modelagem transformam o aço fundido em produtos finais conforme as especificações desejadas (Rizzo, 2006).

A siderurgia verde envolve a adoção de tecnologias inovadoras que minimizem as emissões e melhorem a eficiência energética. Algumas tecnologias e processos notáveis incluem o hidrogénio, como um portador de energia limpa, podem substituir os combustíveis fósseis na redução do minério de ferro, resultando na produção de *aço verde* ou “à base de hidrogénio”. Processos de redução direta baseados em hidrogénio, como o uso de plasma de hidrogénio, apresentam um potencial promissor para alcançar a produção de aço livre de carbono. [Fornos Elétricos a Arco \(EAF\)](#) que são movidos a eletricidade, os [EAF](#) oferecem uma alternativa mais ecológica aos altos-fornos tradicionais. Os [EAF](#) utilizam sucata de aço como matéria-prima principal, reduzindo a dependência do minério de ferro virgem. Eles também permitem um melhor controle da composição do aço e contribuem para uma maior eficiência energética e biomassa e bioenergia que são fontes de energia baseadas em biomassa, como resíduos de madeira ou resíduos agrícolas, podem ser usadas para gerar calor e energia para processos siderúrgicos. A utilização da bioenergia reduz a dependência de combustíveis fósseis e fornece uma opção de energia renovável e neutra em carbono (Rizzo, 2006).

O *aço verde* é produzido usando um método chamado ferro reduzido direto à base de hidrogénio ([H-DR](#)). Este processo substitui o carvão coqueificável, normalmente usado na produção de aço a partir de minérios, por eletricidade renovável e hidrogénio.

Normalmente, o coque é queimado num alto-forno a temperaturas muito altas para fundir o ferro do minério. Isso produz grandes quantidades de CO_2 e consome muita energia, aquecendo a mistura até $1500\text{ }^\circ\text{C}$. O ferro fundido resultante é então processado num forno de oxigénio para formar o aço. No entanto, substituindo o coque por hidrogénio, o ferro esponja pode ser diretamente alimentado num forno elétrico a arco, pois contém menos impurezas e evita o alto-forno (Vogl et al., 2018).

O uso de hidrogénio reduz significativamente a energia necessária e a temperatura do processo, o que também reduz as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, ao contrário do coque, o hidrogénio não produz dióxido de carbono como subproduto, mas sim água, que pode ser reciclada no eletrolisador de hidrogénio. Estudos mostram que o **H-DR** pode reduzir as emissões de CO_2 em até 97,2% em comparação com os métodos convencionais de coque e alto-forno, embora dados mais concretos ainda estejam a ser pesquisados (Vogl et al., 2018).

A Figura 6 compara dois processos de produção de aço: o método tradicional do alto-forno e o processo de produção com tecnologia *Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT)*. No processo do alto-forno, concentrado de minério de ferro é aglomerado em pelotas usando combustíveis fósseis, gerando CO_2 . O carvão é convertido em coque, e no alto-forno, o coque e o oxigénio reagem para produzir ferro-gusa, emitindo mais CO_2 . Esse ferro é então convertido em aço bruto no processo de aciaria (Hybrit, 2018a).

Na processo **HYBRIT**, o concentrado de minério de ferro também é transformado em pelotas, mas com combustíveis não fósseis. Em vez do coque, o hidrogénio, gerado por eletrólise da água a partir de fontes de energia renovável, é utilizado no processo de redução, produzindo ferro-esponja e água (sem emissões de CO_2). O ferro-esponja é então fundido para formar aço, utilizando sucata como material complementar, resultando num processo de produção de aço com menos impacto ambiental (Hybrit, 2018a).

A H2 Green Steel é uma empresa sueca especializada na produção de aço verde (Figura 7), através da descarbonização do processo de transformação do minério de ferro. O hidrogénio verde é um dos elementos desse processo.

A Figura 8 refere-se ao processo de fabricação do aço verde segundo o processo da empresa H2 Green Steel. A etapa inicial para a produção de aço verde começa com a eletrólise, um procedimento no qual a água é decomposta em hidrogénio e oxigénio por meio da aplicação de eletricidade. O **Reator de Indução Direta (DR)** realiza o processo de refinamento do minério de ferro para produzir **Ferro Reduzido Diretamente (DRI)**. Isso é alcançado ao expor o minério de ferro ao

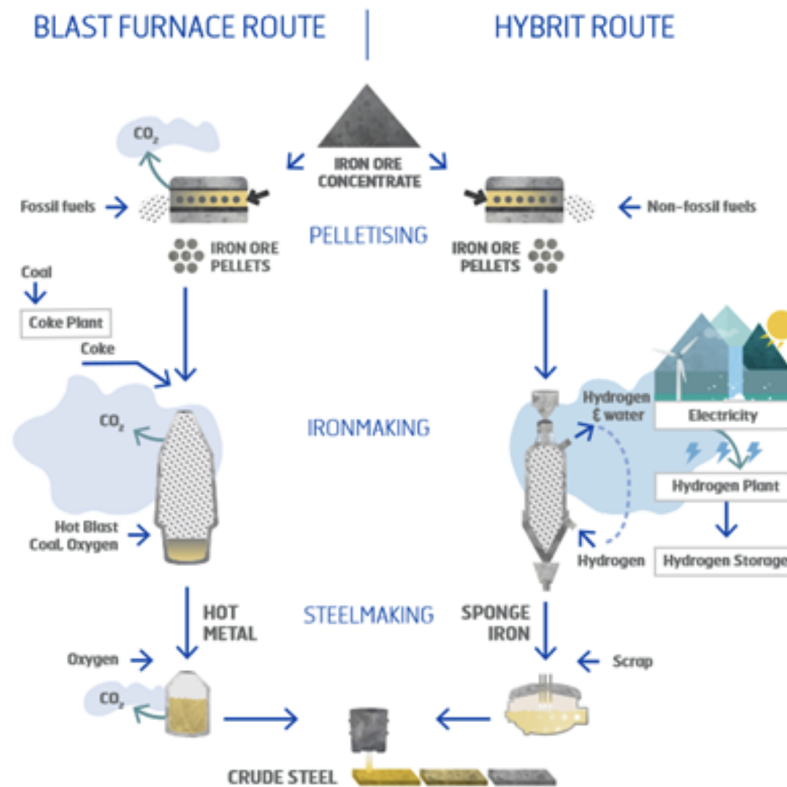


Figura 6: Comparação da produção de aço convencional e aço verde. Retirado de Hybrit, 2018a

hidrogênio, onde ocorre uma reação com o oxigênio presente no minério, resultando na formação de vapor como subproduto. A utilização do hidrogênio verde, produzido por meio da eletrólise, para o processo de redução, em substituição ao carvão comumente utilizado em siderúrgicas integradas, possibilita reduzir as emissões de **CO₂** decorrentes do processo de redução em mais de 95%.

A maior parte do **DRI** é transferida enquanto ainda está quente dentro da usina para o Forno de Arco Elétrico. Uma parte menor é compactada em pequenos blocos sólidos, um processo conhecido como briquetagem, para formar ferro briquetado quente, conhecido como **HBI**, para armazenamento e utilização futura (Hybrit, 2018b).

O Forno de Arco Elétrico representa o estágio inicial na operação de uma fábrica de fusão elétrica. Nesta etapa, a eletricidade proveniente de fontes livres de combustíveis fósseis é empregada para aquecer uma mistura de **DRI** e sucata de aço, resultando numa fusão uniforme de aço líquido. Durante o processo de fusão, o carbono desempenha um papel crucial ao reduzir o consumo de eletricidade, formando

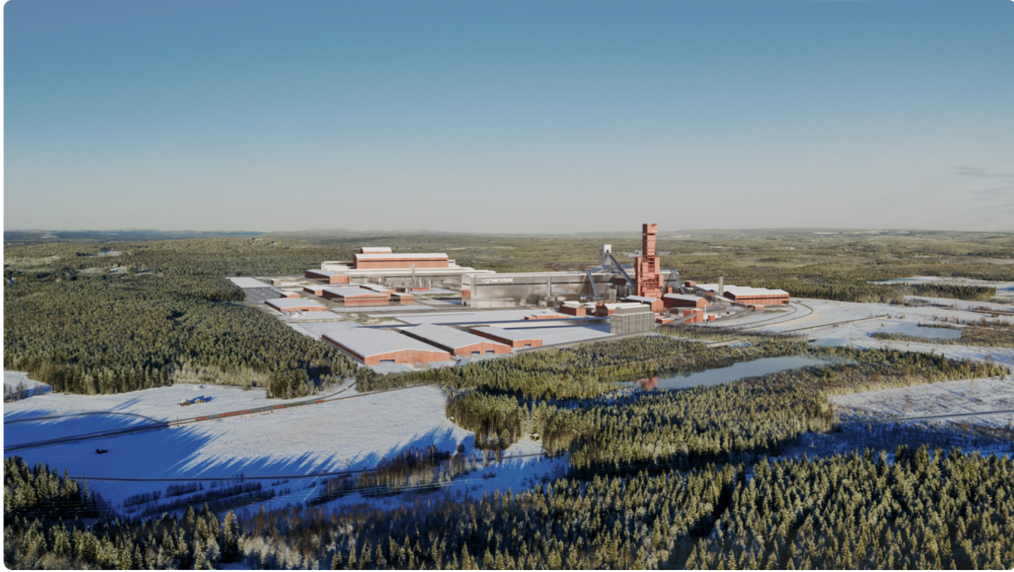


Figura 7: Localização da empresa H2 Green Steel. Retirado de Stegra, 2024.

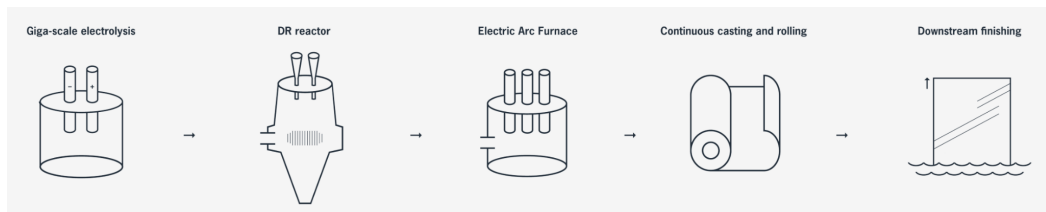


Figura 8: Produção do aço verde. Retirado de Stegra, 2024.

uma camada protetora de escória sobre a superfície da fusão, permitindo assim a conversão do ferro em aço (Hybrit, 2018b).

Posteriormente ao processo no Forno de Arco Elétrico, a fusão é transferida para o forno-panela e o desgaseificador RH. Neste estágio, ligas são adicionadas à fusão para realizar a refinação química necessária (Hybrit, 2018b).

No processo integrado de “fundição e laminagem contínuas”, consegue-se transformar o aço líquido em produtos sólidos, mantendo o material aquecido desde o Forno de Arco Elétrico até à etapa final de produção. Esta abordagem integrada permite reduzir significativamente o consumo de energia em até 70% e substituir o uso de gás natural, que é comumente empregado nos métodos tradicionais de fabricação. Por fim, obtém-se uma tira de aço que é enrolada para formar uma "bobina de rolo quente", conforme ilustrado na imagem da Figura 9, representando o produto inicial produzido na instalação de aço verde (Hybrit, 2018b).

As bobinas de rolo quente são um material amplamente utilizado na produção de aço, especialmente em processos de conformação mecânica. As bobinas de

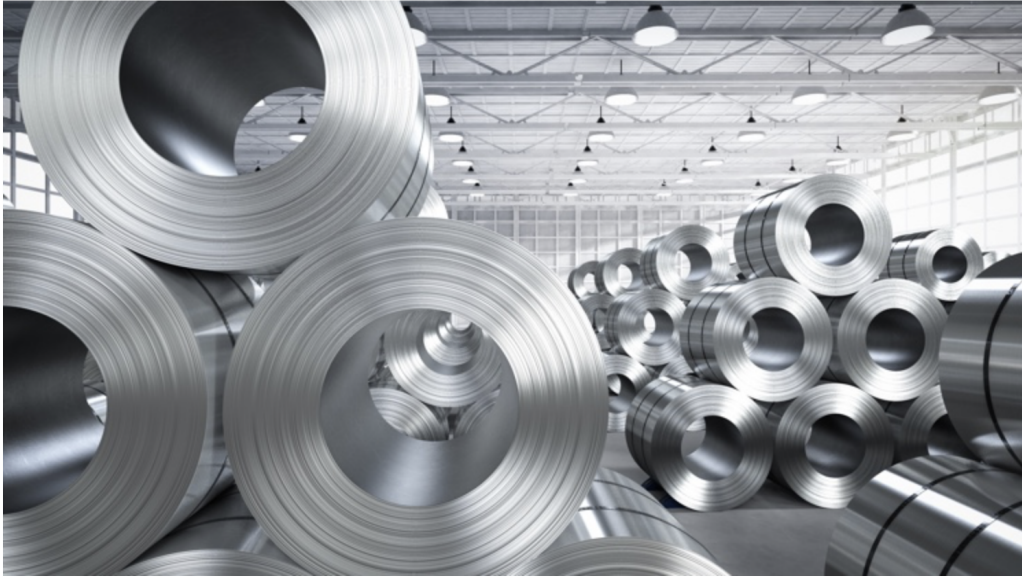


Figura 9: Bobinas de rolo quente. Retirado de Iberdrola, 2021.

rolo quente são fabricadas a partir de aço laminado a altas temperaturas, que garantem maior maleabilidade e resistência ao produto final. Estas bobinas são frequentemente empregadas em indústrias como a automóvel, de construção e fabricação de eletrodomésticos.

Após completar as etapas de fundição e laminação contínuas, algumas das bobinas laminadas a quente são encaminhadas para linhas de acabamento completamente eletrificadas. Aqui, de acordo com as especificações dos clientes finais, os produtos passam por uma série de processos. Isso inclui a laminação a frio para ajustar a espessura, o recozimento para garantir as propriedades mecânicas adequadas e a galvanização por imersão a quente para conferir a resistência à corrosão desejada (Hybrit, 2018b).

A empresa sueca diz que, antes de 2030, a Suécia atingirá uma capacidade de produção de cinco milhões de toneladas de aço de alta qualidade. Este será um complemento significativo à produção de aço sueca existente e aumentará o valor líquido de exportação da Suécia em cerca de 2,58 mil milhões de euros. A crise climática e os requisitos mais rigorosos enfrentados pela indústria estão a aumentar rapidamente a procura, tornando este investimento necessário e urgente (Hybrit, 2018b).

No processo tradicional de fabricação de aço, a emissão de dióxido de carbono é aproximadamente duas vezes o peso do aço produzido. No entanto, a H2 Green Steel tem uma abordagem diferente, estimando que a sua pegada de carbono será de apenas 50 quilos de CO₂ por tonelada de aço (Hybrit, 2018b).

Desta forma, metade da produção anual projetada de 2,5 milhões de toneladas de aço da H2 Green Steel já foi comercializada por meio de contratos de longo prazo com fabricantes de veículos, como Mercedes-Benz, Porsche e Scania, além dos seus fornecedores, incluindo a ZF Friedrichshafen, uma empresa alemã de tecnologia industrial e automóvel (Hybrit, 2018b).

A tecnologia de produção de aço existente deixa a indústria siderúrgica como a maior emissora de dióxido de carbono da Suécia. Em nível europeu, a indústria siderúrgica é responsável por 6% das emissões de dióxido de carbono, e globalmente, o número varia de 7 a 9%. Os princípios básicos e a tecnologia da produção de aço de hoje são essencialmente os mesmos de há mais de cem anos. A produção tem sido tipicamente localizada perto de minas de carvão, já que o carvão de coque é usado na conversão de minério de ferro em ferro e aço (Hybrit, 2018b).

Projetos de investigação e desenvolvimento, como o [HYBRIT](#), juntamente com avanços tecnológicos em hidrogénio e uma abordagem mais inteligente baseada em processos utilizando Inteligência Artificial, significam que as condições estão agora prontas para a produção em larga escala de aço verde e económico. A produção tradicional de aço é baseada no fornecimento de coque e carvão. No atual processo, a tecnologia tradicional baseada em alto-forno é substituída por reatores de redução direta (Hybrit, 2018a).

Os reatores de redução direta estão em operação há mais de 50 anos em locais onde o gás natural pode ser adquirido de forma barata. Num reator de alimentação de gás natural, a redução do minério de ferro ocorre com monóxido de carbono para produzir ferro-esponja e dióxido de carbono e hidrogénio para produzir ferro-esponja e água. Substituir o gás natural por hidrogénio verde para permitir que apenas ferro-esponja e água sejam produzidos. Além disso, eletrifica cada etapa do processo de todo o fluxo de produção. Dessa forma, praticamente as únicas emissões são de vapor, reduzindo as emissões de dióxido de carbono em até 90% desde o início, com o objetivo de reduzir as emissões a zero (Hybrit, 2018a).

A instalação será totalmente integrada, com carregamento a quente em cada etapa ao longo do fluxo de produção. Portanto, devem limitar a quantidade de energia usada, armazenamento e manuseio de materiais. A fábrica também maximizará a circularidade. A sucata reciclada será carregada no forno a arco elétrico, o calor desperdiçado será enviado para os canais de aquecimento distrital de Luleå-Boden e a escória será processada em produtos a serem usados em outras indústrias.

A produção será localizada em Norrbotten porque o norte da Suécia oferece oportunidades únicas para a produção de aço verde, com bom acesso à eletricidade

sem combustíveis fósseis, ao minério de ferro da melhor qualidade da Europa e uma indústria siderúrgica especializada e inovadora. A eletricidade sem combustíveis fósseis e a sua conversão em hidrogénio são componentes-chave da nossa abordagem.

Ao usar a mais recente tecnologia em cada etapa do caminho, cria-se uma linha de produção em larga escala totalmente integrada que produzirá aço verde. O aço verde de alta qualidade pode ser usado em indústrias que precisam transformar toda a sua cadeia de suprimentos para livre de combustíveis fósseis, como automotivo, veículos comerciais, eletrodomésticos, móveis e equipamentos industriais.

O potencial de reciclagem do aço é um aspeto crucial que merece destaque quando se discute a sua sustentabilidade. Por meio de um processo totalmente elétrico e de baixas emissões, o aço pode ser reciclado repetidamente, preservando as suas propriedades essenciais. Essa capacidade de reciclagem infinita não apenas reduz o desperdício de recursos naturais, mas também contribui significativamente para a redução do impacto ambiental da indústria siderúrgica.

Ao optar por um processo de reciclagem do aço que seja completamente elétrico, minimiza-se a dependência de combustíveis fósseis e reduzem-se as emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem alinha-se diretamente aos esforços globais de combate às mudanças climáticas, pois contribui para a redução da pegada de carbono da produção de aço. Além disso, a reciclagem do aço ajuda a mitigar a necessidade de extrair novos recursos minerais, promovendo assim uma gestão mais eficiente e responsável dos recursos naturais.

Alcançar a produção de aço verde requer colaboração entre as partes interessadas da indústria, governos e instituições de pesquisa. Os governos podem desempenhar um papel crucial ao implementar políticas de apoio, proporcionando incentivos financeiros e estabelecendo marcos regulatórios que incentivem a adoção de práticas siderúrgicas mais ecológicas. Esforços colaborativos entre os participantes da indústria podem facilitar o compartilhamento de conhecimento, o desenvolvimento tecnológico e a ampliação de soluções sustentáveis para a produção de aço. A siderurgia verde representa um passo significativo para alcançar uma indústria siderúrgica mais sustentável, alinhando-se aos objetivos globais de combate às mudanças climáticas e de preservação ambiental.

A Boston Metal está a introduzir uma inovação significativa na fabricação de aço por meio da sua plataforma de [Eletrólise de Óxido Fundido \(MOE\)](#). Este método se distingue por utilizar eletricidade limpa em vez de combustíveis fósseis, abordando diretamente a produção de aço com uma abordagem que promete ser económica, escalável e que gera valor em toda a cadeia de valor do aço (Ellerbeck, 2024).

A tecnologia **MOE** desenvolvida pela Boston Metal elimina a necessidade de carvão e os subprodutos associados com a produção convencional de aço, como o coque e a sinterização. Em vez disso, utiliza eletricidade renovável para converter minério de ferro diretamente em metal líquido de alta qualidade. O processo ocorre numa célula de eletrólise onde um ânodo inerte é imerso num eletrólito contendo minério de ferro. Através da eletrificação e do aquecimento a 1600 °C, os eletrões quebram as ligações no óxido de ferro, produzindo metal líquido puro e libertando apenas oxigénio como subproduto. Esta abordagem reduz a complexidade e o impacto ambiental ao eliminar a necessidade de várias etapas tradicionais, como a redução no alto-forno e o refinamento básico no forno de oxigénio (Ellerbeck, 2024).

Na Figura 10 representa unidade de eletrólise na sede da empresa Boston Metal que tem o potencial de transformar a indústria siderúrgica, ao oferecer uma alternativa com baixas emissões de **CO2** e maior eficiência energética, contribuindo para a descarbonização do setor.

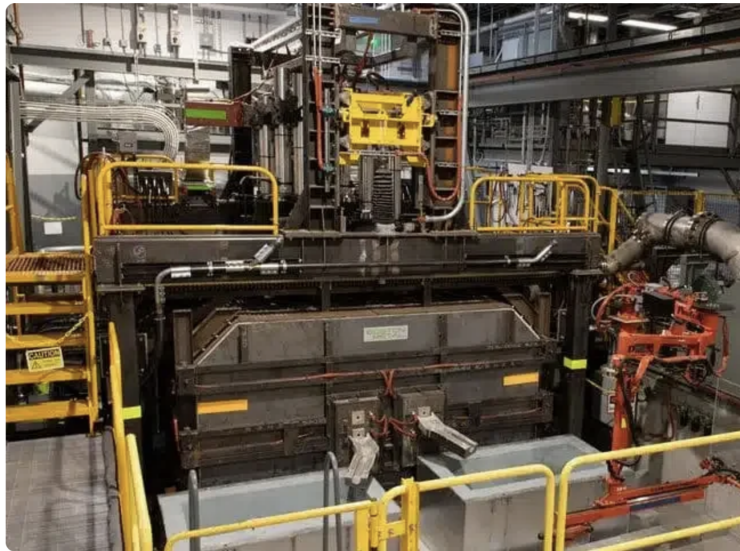


Figura 10: Unidades de eletrólise na sede da empresa Boston Metal. Retirado de Ellerbeck, 2024

Os principais benefícios da tecnologia **MOE** incluem (Hybrit, 2018b):

- **Zero Emissões de CO2:** A tecnologia elimina as emissões de dióxido de carbono, não requer carvão, coque ou processos que envolvam captura de carbono. A utilização de eletricidade renovável substitui etapas intensivas em carbono, tornando o processo de fabricação de aço significativamente mais limpo.
- **Eficiência Económica:** O **MOE** é descrito como uma solução eficiente e competitiva em termos de custos. A capacidade de converter minério de ferro de

baixo e médio grau diretamente em ferro fundido de alta pureza maximiza o uso de matérias-primas, permitindo um fornecimento mais amplo e eficiente.

- **Modularidade e Escalabilidade:** A tecnologia é projetada para ser modular e escalável. As células de eletrólise têm um tamanho compacto, semelhante ao de um autocarro escolar, e podem ser ampliadas facilmente para atender a diferentes volumes de produção. Esta flexibilidade permite a adaptação da tecnologia para atender a necessidades variáveis ao redor do mundo.

A Boston Metal está posicionada para alcançar a comercialização da sua tecnologia até 2026, respondendo à crescente demanda global por aço verde. O desenvolvimento contínuo inclui a construção de células semi-industriais e instalações de demonstração para validar e expandir a tecnologia. A empresa prevê que o seu negócio de metais de alto valor começará a gerar receita a partir de 2024, demonstrando um avanço promissor na descarbonização da indústria siderúrgica (Ellerbeck, 2024).

A tecnologia desenvolvida pela Boston Metal apresenta um avanço significativo relativamente às alternativas tradicionais de produção de aço verde, como o uso de hidrogénio. Ao contrário das abordagens convencionais, a solução proposta pela Boston Metal permite o aproveitamento de qualquer tipo de minério de ferro, independentemente da sua qualidade. Isto representa uma vantagem notável, considerando que a alternativa baseada em hidrogénio enfrenta desafios substanciais devido à sua dependência de minérios de ferro altamente ricos (Ellerbeck, 2024).

A tecnologia da Boston Metal se distingue pelo seu processo inovador que, ao invés de utilizar carbono para a redução do óxido de ferro, permite a libertação de oxigénio de forma natural. Esse método não só elimina a necessidade de carvão e outros equipamentos tradicionais, como coquerias e fornos de fabricação de aço, mas também reduz significativamente o espaço físico necessário para a produção. O processo é baseado em células eletrónicas que substituem os equipamentos convencionais, e o minério de ferro apenas precisa ser seco, sem a necessidade de pelotização (Ellerbeck, 2024).

Além da sua eficiência ambiental, a modularidade do processo da Boston Metal oferece flexibilidade operacional. A capacidade de produção pode ser ajustada facilmente adicionando ou removendo células eletrónicas, o que torna a tecnologia escalável e adaptável às necessidades específicas de produção. Esta modularidade é particularmente relevante para a indústria da construção civil, pois pode contribuir para a redução dos custos associados às matérias-primas, oferecendo uma solução mais económica e sustentável para a fabricação de aço (Ellerbeck, 2024).

Portanto, a tecnologia da Boston Metal não só aborda as limitações associadas ao uso de hidrogénio na produção de aço verde, como também oferece uma alternativa que é ambientalmente sustentável e economicamente vantajosa, transformando potencialmente o panorama da produção de aço e beneficiando setores como a construção civil.

Como visto anteriormente, há várias formas de descarbonizar o setor siderúrgico: a produção de aço verde e reciclado emergiu como uma solução promissora. O aço verde, produzido com tecnologias que minimizem a emissão de CO₂, e o aço reciclado, que reutiliza material existente para reduzir a necessidade de novas matérias-primas, são avanços significativos.

A lama vermelha é um subproduto da extração do alumínio que representa um desafio ambiental significativo, com a produção de alumínio que gera anualmente cerca de 180 milhões de toneladas dessa substância tóxica. Essa lama, resultante do processamento da bauxite, é composta por diversos elementos, incluindo ferro, titânio, silício e sódio, além de alumínio não extraído (Jovičević-Klug et al., 2024).

Recentemente, uma equipa de engenheiros alemães desenvolveu uma técnica inovadora para transformar a lama vermelha num tipo de aço mais sustentável. Utilizando um forno elétrico a arco, eles conseguem converter o óxido de ferro presente na lama em ferro metálico por meio de plasma de hidrogénio. Esse processo, que dura apenas dez minutos, não só é eficiente, mas também economicamente viável, permitindo que o ferro obtido seja diretamente utilizado na produção de aço (Jovičević-Klug et al., 2024).

A lama vermelha é um resíduo que, quando mal gerenciado, pode causar desastres ambientais, como vazamentos corrosivos que resultaram em acidentes em diferentes partes do mundo. Porém, após o processamento para extração do ferro, os resíduos remanescentes solidificam-se numa forma não corrosiva, que pode ser utilizada como material de construção, contribuindo para uma gestão mais sustentável desses resíduos.

Com essa inovação, o uso da lama vermelha como recurso na produção de aço não apenas aborda a questão da sua disposição inadequada, mas também oferece uma alternativa promissora para uma indústria siderúrgica mais limpa e eficiente (Jovičević-Klug et al., 2024).

A Figura 11 ilustra o processo de produção de aço a partir da bauxite, com especial destaque para a geração e o tratamento da lama vermelha. A primeira parte do esquema mostra as etapas do processo Bayer, desde a extração da bauxite até à geração de lama vermelha e produção do aço por eletrólise. O canto superior direito

destaca um processo experimental de tratamento da lama vermelha, utilizando um eletrodo de tungstênio e um reator que, ao contrário de outros processos industriais, não emite dióxido de carbono, produzindo apenas água e material solidificado. No canto inferior, observa-se uma área de acumulação de lama vermelha. A seção à direita evidencia a formação de nódulos de ferro a partir da lama vermelha, que podem ser usados na produção de aço e na extração de elementos de terras raras, promovendo um reaproveitamento mais sustentável deste resíduo.

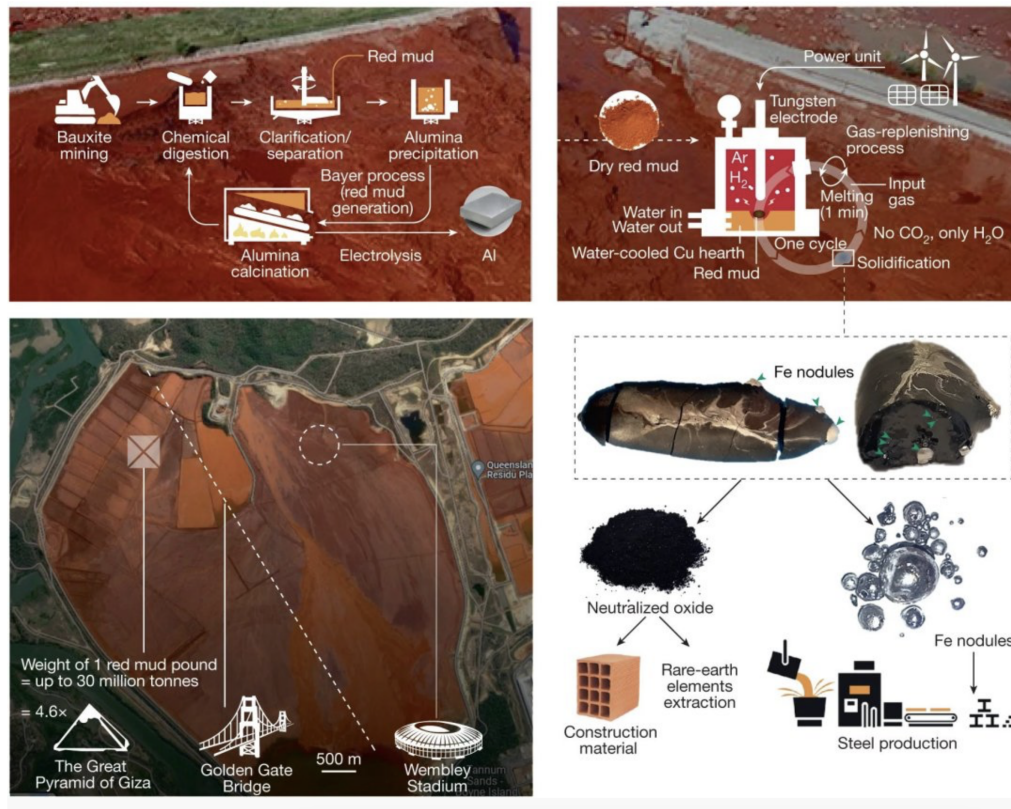


Figura 11: A geração, armazenamento e perigos de lamas vermelhas e solução com tratamento com plasma de hidrogênio. Retirado de Jovičević-Klug et al., 2024

Estudos indicam que a aplicação deste método para processar a lama vermelha acumulada globalmente poderia reduzir em cerca de 1,5 mil milhões de toneladas as emissões de CO_2 associadas à indústria do aço, que é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais desse gás. Além de mitigar as emissões de gases de efeito estufa, o processo também neutraliza os metais pesados tóxicos presentes na lama vermelha, tornando-a ambientalmente segura e contribuindo para uma gestão mais eficaz dos resíduos (Lira, 2022).

Com a previsão de um aumento de 60% na necessidade por metais até 2050, este método surge como uma solução oportuna e fiável. A descoberta oferece um duplo

benefício: resolve o problema dos resíduos da produção de alumínio e melhora a pegada de carbono da indústria do aço (Jovičević-Klug et al., 2024).

Além dos benefícios ambientais, o método também é economicamente viável, desde que a lama vermelha contenha pelo menos 35% de óxido de ferro. O custo do hidrogénio verde e da eletricidade, bem como os custos associados ao aterro da lama vermelha, são considerados dentro do modelo económico proposto.

No entanto, é crucial que o armazenamento e a gestão da lama vermelha sejam cuidadosamente monitorizados para evitar desastres ambientais semelhantes ao ocorrido na Hungria em 2010, quando uma bacia de retenção rompeu, causando grave impacto ambiental e perdas humanas (Lira, 2022).

3.2 AÇO VERDE NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da construção é reconhecido como um dos principais consumidores de aço em escala global, respondendo por aproximadamente metade do consumo total desse material (51%). Entretanto, a transição para o uso voluntário do aço verde nesse setor enfrenta uma série de desafios substanciais. Primeiramente, a cadeia de suprimentos da indústria da construção é notoriamente complexa, caracterizada pela descentralização e fragmentação, com a participação de diversos atores, como arquitetos, fabricantes, construtores, proprietários e arrendatários de edifícios. A coordenação entre esses intervenientes é dificultada pela diversidade de interesses e pela operação com margens de lucro reduzidas (Dassault Systèmes SE, 2022).

A indústria da construção é conhecida por sua estrutura contratual complexa e pela presença de múltiplos níveis de empreiteiros subcontratados em cada projeto. Cada um desses atores busca otimizar as suas margens e reduzir custos, o que dificulta a adoção do aço verde, a menos que haja um consumo específico e uma disposição para pagar um preço diferenciado pelo material (Dassault Systèmes SE, 2022).

O aço é apenas um dos muitos elementos que compõem um edifício, e os consumidores muitas vezes não estão cientes da sustentabilidade do processo de construção em termos de emissões de GEE. A percepção de sustentabilidade está mais relacionada ao uso eficiente de energia e à operação sustentável dos edifícios. Portanto, a procura por aço verde na construção pode estar ligada a edifícios já operando com alta eficiência energética, considerando que as emissões durante a construção

representam uma parcela significativa das emissões ao longo do ciclo de vida (Havit Steel Structure, 2021).

Já a eficiência energética em edifícios, que inicialmente surgiu como um esforço para diminuir a perda de energia em construções nos países desenvolvidos, tornou-se uma área de grande relevância. Este conceito abrange a renovação de grandes edifícios, edifícios públicos e governamentais, bem como espaços residenciais. Sendo uma área tão próxima do dia a dia das pessoas, a eficiência energética nos edifícios é uma forma de o público perceber de forma mais clara os benefícios práticos da economia de energia, incentivando a sua participação ativa (Havit Steel Structure, 2021).

As estruturas de aço são amplamente utilizadas em edifícios públicos, como arranha-céus, grandes estruturas espaciais, plantas industriais e terminais de aeroportos. No entanto, o seu uso no setor residencial ainda é limitado. Do ponto de vista do custo, a estrutura de aço pode parecer mais cara do que a de betão. Mas, se considerarmos o tempo de construção reduzido, menor prazo de financiamento, menores custos de demolição e descarte, além dos benefícios de reciclagem e reutilização dos materiais, o custo total ao longo do ciclo de vida pode ser comparável, ou até inferior, ao do betão (Havit Steel Structure, 2021).

Além disso, as estruturas de aço proporcionam uma construção mais leve e resistente, com processos secos que melhoram a qualidade do projeto e a segurança. Esta abordagem também contribui significativamente para a construção sustentável e melhora o desempenho e a qualidade dos edifícios, além de aumentar a capacidade de prevenção e mitigação de desastres (Scheyrer, 2023). A Figura 12 mostra algumas construções em aço.

No entanto, é importante ressaltar que o mercado de edifícios verdes ainda é uma parte relativamente pequena da indústria da construção em geral. Diante disso, o potencial papel do aço verde na descarbonização do setor global de construção é limitado, dadas as dimensões ainda modestas do mercado de construção verde (Dassault Systèmes SE, 2022).

As casas construídas com estruturas de aço têm desempenhado um papel fundamental na evolução dos edifícios sustentáveis. Este tipo de construção, que dispensa tijolos e betão, utiliza uma abordagem inovadora, onde a montagem das casas é comparável à montagem de um automóvel. Este método tem vindo a ganhar popularidade e está a contribuir para a modernização do setor da construção verde (Scheyrer, 2023).



Figura 12: Construções em aço. Retirado de Havit Steel Structure, 2021.

Comparado com os materiais tradicionais, como o tijolo e o betão, o aço oferece inúmeras vantagens. Como um material de construção mais recente, a estrutura de aço destaca-se pela sua capacidade de promover a conservação de energia e a sustentabilidade ambiental. Além disso, apresenta um desempenho superior em termos de resistência sísmica e permite otimizar a utilização do espaço, aumentando a área útil das construções. Tudo isto faz do aço uma solução estratégica para a promoção de edifícios sustentáveis e eficientes (Havit Steel Structure, 2021).

O setor de engenharia civil está prestes a passar por uma grande transformação na produção de aço, o que é crucial para alcançar a meta de emissões líquidas zero até 2050. A adoção do aço verde, que é produzido com menor emissão de carbono, não apenas diminuirá a pegada de carbono dos projetos de construção, mas também servirá como exemplo para outros setores industriais (Scheyrer, 2023).

A utilização de aço verde nos projetos de construção ajudará a estabelecer um padrão para práticas sustentáveis em diversas indústrias. Isso significa que outros setores poderão seguir o exemplo da engenharia civil, adotando métodos mais ecológicos e contribuindo para a redução global das emissões de carbono.

3.3 VANTAGENS E DESVANTAGEM DO AÇO VERDE

A construção em aço verde oferece inúmeras vantagens. Ao avaliar as suas vantagens e desvantagens, é importante reconhecer tanto os seus benefícios ambientais quanto aos desafios práticos que os profissionais da construção civil podem enfrentar ao implementá-lo nos seus projetos.

Entre as principais vantagens do aço verde estão a redução da emissão de **GEE**, a conservação de recursos naturais, a maior durabilidade das estruturas e a possibilidade de reciclagem ao final da vida útil do edifício. Além disso, o uso do aço verde pode contribuir para a obtenção de certificações de sustentabilidade, agregando valor aos projetos e atendendo à procura cada vez maior por construções ambientalmente responsáveis (Iberdrola, 2021).

Uma das maiores facilidades da construção em aço verde é a capacidade de modularizar, padronizar, pré-fabricar, montar e produzir os edifícios de forma mecanizada. Isso transforma o estaleiro de obras num local mais limpo e organizado, sem a necessidade de fogo, água, poeira ou produção de lixo. O aço é um material reciclável, o que alinha a construção ao conceito de sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do edifício (Havit Steel Structure, 2021).

No entanto, é importante reconhecer que a implementação do aço verde pode enfrentar desafios, como custos iniciais mais altos em comparação com materiais convencionais, limitações técnicas em certos tipos de projetos e a necessidade de garantir a qualidade e a procedência do material utilizado (Iberdrola, 2021).

Os edifícios de estrutura de aço incorporam naturalmente princípios de baixo carbono, economia de energia e redução de emissões. Esses edifícios podem ser reciclados e reutilizados em todas as etapas da sua vida útil: desde o projeto arquitetônico, passando pela construção e demolição, até a reconstrução em novos locais (Iberdrola, 2021).

Por outro lado, os edifícios tradicionais de betão utilizam materiais como cimento, areia e cascalho, que não são recicláveis. A demolição desses edifícios gera resíduos difíceis de degradar, aumentando a pressão ambiental. Portanto, para promover a conservação de energia na construção civil, é essencial migrar do modelo tradicional de betão para estruturas de aço pré-fabricadas.

No contexto mais amplo da construção civil, o impacto do aço verde é significativo e está a transformar a maneira como os profissionais concebem e executam projetos de edificação. A crescente procura por construções sustentáveis, impulsionada por

regulamentações ambientais mais rígidas e pela consciencialização pública, tem levado à adoção generalizada do aço verde em diversos países. Essa tendência não apenas promove a redução dos impactos ambientais da construção civil, mas também impulsiona a inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas construtivas (Havit Steel Structure, 2021).

A longo prazo, o uso generalizado do aço verde tem o potencial de promover uma mudança fundamental na indústria da construção civil, tornando-a mais sustentável, eficiente e resiliente. No entanto, para alcançar esse objetivo, é crucial que os profissionais da construção civil trabalhem em conjunto com fabricantes, reguladores e outras partes interessadas para superar os desafios e maximizar os benefícios do aço verde em todos os aspetos da construção. Neste aspeto, o meio académico pode dar uma função importante, na tarefa de divulgar, difundir e esclarecer sobre os benefícios de sustentabilidade do aço verde.

A produção de aço verde resulta numa diminuição das emissões de gases poluentes do ar, como CO, CO₂ e SO_x, além de reduzir a presença de contaminantes em águas residuais, resíduos perigosos (tais como arsénico, chumbo e zinco) e outros detritos sólidos (TheCivilEngineer.org, 2024).

O aço verde busca minimizar as emissões de CO₂ por meio da adoção de tecnologias e fontes de energia mais limpas. Isso envolve o uso de energias renováveis, como a eólica, solar ou hidroelétrica, para alimentar os processos de produção de aço, reduzindo assim a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, tecnologias de captura e utilização de carbono podem ser empregues para capturar, armazenar ou reaproveitar as emissões de CO₂ geradas durante a produção do aço (TheCivilEngineer.org, 2024).

O aço verde promove a reciclagem e reutilização de materiais, especialmente a sucata de aço. A reciclagem não só reduz a demanda por matérias-primas virgens, mas também economiza energia em comparação com a produção de aço primário. Isso se alinha aos princípios da economia circular, onde produtos e materiais são mantidos em uso pelo maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos e maximizando a eficiência dos recursos.

A siderurgia verde foca-se em minimizar a geração de resíduos e maximizar a utilização de subprodutos e resíduos. Ao converter fluxos de resíduos, como escória e lamas, em recursos valiosos para outras indústrias ou aplicações, o aço verde contribui para a redução de resíduos e promove a eficiência dos recursos.

O aço verde considera a gestão sustentável de recursos ao reduzir a extração de recursos naturais e minimizar o impacto ambiental associado à mineração e

processamento de matérias-primas. O objetivo é otimizar o uso de recursos em todo o processo de produção siderúrgica (TheCivilEngineer.org, 2024).

O aço verde leva em consideração todo o ciclo de vida do aço, desde a extração da matéria-prima até a produção, uso e considerações de fim de vida. Ferramentas de avaliação do ciclo de vida ajudam a avaliar o impacto ambiental das diferentes fases e a identificar áreas de melhoria para alcançar a sustentabilidade.

3.4 PERSPETIVAS DO AÇO VERDE

Com o avanço contínuo das tecnologias de construção em aço verde, particularmente no desenvolvimento de estruturas integradas — que incluem painéis ecológicos, portas e janelas modernas, novos materiais decorativos e sistemas eficientes de água, aquecimento, eletricidade e gás — as estruturas de aço pré-fabricadas estão a ganhar cada vez mais espaço no mercado. Estes edifícios, lançados como produtos industriais sistemáticos, estão a ser amplamente aceites pelo público (Havit Steel Structure, 2021).

No cenário atual de metas de pico de carbono e neutralidade carbónica, as construções de aço pré-fabricadas têm um futuro promissor. Não só estão destinadas a expandir-se no mercado, mas também a contribuir significativamente para um ambiente mais sustentável e eficiente. Apesar dos avanços tecnológicos, a viabilidade económica da produção de aço verde ainda enfrenta desafios significativos. Estima-se que os produtos siderúrgicos com baixas emissões de carbono possam custar entre 20% e 50% mais do que o aço convencional, sendo que as unidades pioneiras de produção de aço verde são ainda mais dispendiosas (TheCivilEngineer.org, 2024).

A introdução de uma tarifação de carbono poderia ajudar a reduzir esta diferença de custos. No entanto, atualmente não existe um mecanismo global coordenado para tal. Políticas regionais que impõem custos adicionais aos produtores de aço podem ter impactos negativos, como a redução da quota de mercado e a diminuição de investimentos em regiões que adotam medidas rigorosas de controlo climático. Estas políticas ambientais regionais podem aumentar os custos de produção para os fabricantes de aço, resultando numa desvantagem competitiva no mercado global e afetando negativamente a participação de mercado e os investimentos nessas áreas. Portanto, é essencial desenvolver uma abordagem global coordenada para a tarifação de carbono, de modo a mitigar estes impactos e promover a produção sustentável de aço.

À medida que o mundo se prepara para a [Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática \(COP26\)](#), o compromisso da indústria siderúrgica em desenvolver um plano concreto e viável para a redução de emissões é um sinal positivo. Esse compromisso oferece esperança para o desenvolvimento sustentável não só na engenharia civil, mas também em outras áreas, demonstrando que a colaboração e a inovação são caminhos viáveis para um futuro mais sustentável (TheCivilEngineer.org, 2024).

O aço verde representa uma solução inovadora crucial para a descarbonização da indústria siderúrgica. Um número crescente de empresas está a investir significativamente nessa tecnologia. No entanto, é essencial considerar o panorama completo, pois a introdução do aço verde pode trazer novas fontes de emissões de carbono na cadeia de suprimentos, como na produção de hidrogênio usado no processo ou na incorporação de aço reciclado. Portanto, uma avaliação da pegada de carbono do aço verde é fundamental para entender completamente as suas emissões de [CO₂](#) e otimizar a sua contribuição para um futuro sustentável (Scheyrer, 2023).

3.5 CICLO DE VIDA

Na produção de aço, a produção primária normalmente refere-se à obtenção de ferro (metal líquido) a partir de minério de ferro num [Alto-forno \(BF\)](#), que depois é transformado em aço no [Forno Básico a Oxigênio \(BOF\)](#). Já a “produção secundária” está associada ao processo de reciclagem, sendo realizada principalmente no forno de arco elétrico ([EAF](#)), que funde sucata de aço para produzir novo aço. No entanto, a produção primária de aço não é exclusiva do processo [BOF](#), assim como a produção secundária não se limita ao [EAF](#). É comum que entre 10% e 30% de sucata seja utilizada como matéria-prima no processo [BOF](#). Além disso, a produção primária de aço também pode ocorrer no processo [EAF](#), quando o ferro pré-reduzido é usado no processo, como mostrado na [Figura 13](#) (Broadbent, 2016).

No lado esquerdo da [Figura 13](#), vemos o processo [EAF](#), que pode utilizar tanto sucata de aço como minério de ferro pré-reduzido ([DRI](#)) para produzir aço. Este aço resultante pode ser classificado como aço secundário devido à utilização de materiais reciclados (sucata). No lado direito, o processo [BF/BOF](#) usa minério de ferro e também sucata como matéria-prima para a produção de aço. Este aço produzido é denominado aço primário, embora uma parte dele possa ser derivada da sucata, o que mostra a flexibilidade do processo.

O aço é completamente reciclável, e a sucata pode ser convertida no mesmo tipo de aço ou em aço de maior ou menor qualidade, dependendo do tratamento metalúrgico

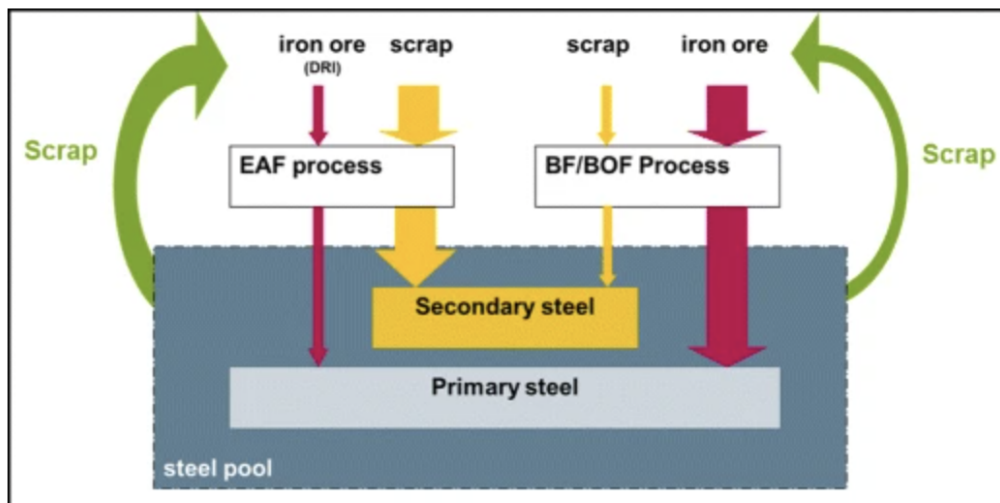


Figura 13: Conexão entre a produção primária e secundária de aço. Retirado de Broadbent, 2016.

e do processo necessário. Alguns produtos reciclados, como varões, requerem pouco processamento, enquanto aços de engenharia de maior valor necessitam de mais controlo metalúrgico para cumprir requisitos mais rigorosos. O valor económico final do produto não depende do conteúdo reciclado; há muitos exemplos de produtos de alto valor contendo grandes quantidades de aço reciclado. Certos tipos de aço são produzidos principalmente pelo processo primária, devido à necessidade de níveis muito baixos de elementos residuais, algo que é mais fácil de alcançar com materiais primários. A sucata com baixo teor de elementos residuais tende a ter um valor de mercado mais elevado, devido à facilidade de processamento (Broadbent, 2016).

A crescente procura global por aço permite uma absorção contínua de sucata. Contudo, não há sucata suficiente disponível para suprir toda a produção necessária para satisfazer o mercado. Isto não se deve a falhas na recolha de sucata, já que as taxas de recuperação de produtos de aço são elevadas e a vida útil destes produtos é longa. À medida que avançamos para uma economia circular, um aumento na disponibilidade de sucata poderá elevar a proporção de aço produzido via EAF. Melhorias nas unidades de tratamento de sucata e na separação dos diferentes tipos de sucata irão aumentar a eficiência do processo de fabrico de aço (Broadbent, 2016).

Para avaliar a pegada de carbono da produção de aço, utilizam-se diferentes ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O Inventário de Ciclo de Vida (ICV) consiste na recolha de dados sobre emissões, identificando as suas fontes, e serve de base para a ACV. A World Steel Association mantém uma base de dados

de **ICV** para diversos produtos de aço. A **ACV**, por sua vez, é a interpretação destes dados de **ICV** num contexto sistémico, exigindo decisões sobre os limites do sistema e a alocação de emissões. Desta forma, diferentes interpretações dos mesmos dados de **ICV** podem levar a resultados variados numa **ACV** (Broadbent, 2016).

Nos últimos 20 anos, surgiram duas abordagens principais na **ACV**: **ACV** atribucional e **ACV** consequencial. A **ACV** atribucional é uma ferramenta contabilística que atribui as emissões reais a produtos finais específicos numa cadeia de valor. Em contraste, a **ACV** consequencial avalia as consequências de mudanças numa cadeia de valor existente ou a introdução de uma nova cadeia. Esta abordagem é prospetiva e útil para decisões estratégicas, como a comparação de investimentos futuros (Finnveden et al., 2009).

3.5.1 *Emissões Indiretas do Uso de Eletricidade*

A **ACV** atribucional contabiliza as emissões de **CO2** da eletricidade com base nas emissões reais no momento da análise. Por exemplo, a World Steel Association calcula estas emissões utilizando o fator de emissão da rede elétrica da região ou país relevante. Esse fator pode variar significativamente; por exemplo, na **UE**, ele é de 296 gramas de **CO2** por kWh, mas varia bastante entre os Estados-Membros. No entanto, esta abordagem oferece apenas uma visão estática das emissões (World Steel Association, 2017).

A **ACV** consequencial, por outro lado, analisa mudanças no sistema elétrico usando duas abordagens: produção marginal de curto prazo e produção marginal de longo prazo. A produção marginal de curto prazo reflete mudanças imediatas no sistema, geralmente resultando em emissões mais altas, já que se baseia em fontes como carvão ou gás natural. Em contrapartida, a produção marginal de longo prazo considera investimentos futuros, predominantemente em energias renováveis, como eólica e solar. Assim, esta abordagem é mais adequada para avaliar as emissões futuras da produção de eletricidade, assumindo que novos investimentos serão em fontes renováveis (European Environment Agency, 2021).

3.5.2 *Emissões do Aço Reciclado e Benefícios do CCU*

Para a sucata de aço no final da vida útil, surge a questão de atribuir ou não uma "carga de emissões" dos ciclos de vida anteriores. Na **ACV** atribucional, as emissões

do aço reciclado podem ser calculadas pela abordagem de “conteúdo reciclado” (100–0) ou “carga evitada” (0-100). A abordagem de conteúdo reciclado atribui todas as emissões ao processo de fabrico primário, enquanto a abordagem de carga evitada atribui parte ou toda a carga de emissões anteriores ao aço reciclado. O método “net-scrap” da World Steel Association, baseado na carga evitada, incentiva produtos que produzem mais sucata do que consomem. No entanto, a abordagem de conteúdo reciclado está mais alinhada com os objetivos da economia circular, incentivando o uso de aço reciclado em produtos.

Além disso, a **Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCU)** na fabricação de aço pode transformar o **CO₂** em matéria-prima para a indústria química, substituindo recursos fósseis. Projetos como Carbon2Chem¹ e Steelanol² exemplificam esta colaboração entre as indústrias de aço e química. Numa **ACV** consequencial, é crucial compreender as mudanças nos sistemas envolventes e alocar corretamente as emissões para subprodutos e resíduos. À medida que a política climática evolui, o valor de utilizar **CO₂** residual para substituir matérias-primas fósseis pode diminuir, exigindo uma reavaliação constante destes processos (European Environment Agency, 2021).

1 Carbon2Chem é um projeto colaborativo liderado pela thyssenkrupp AG que visa converter gases residuais da produção de aço em precursores químicos. Mais informações disponíveis em: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/company/sustainability/carbon2chem/carbon2chem.html>

2 Steelanol é um projeto da ArcelorMittal que converte gases residuais ricos em carbono da produção de aço em bioetanol. Mais informações disponíveis em: <https://www.steelanol.eu/en>

DESAFIOS DA SUSTENTABILIDADE E O AÇO VERDE

A sustentabilidade no contexto do “aço verde” refere-se à produção de aço de forma ambientalmente responsável, minimizando as emissões de gases de efeito estufa e promovendo a eficiência energética ao longo de toda a cadeia produtiva. Este conceito surgiu como uma resposta às crescentes preocupações ambientais e à necessidade de reduzir o impacto negativo da indústria siderúrgica no meio ambiente.

Como já mencionado no Capítulo 3, o “aço verde” é produzido utilizando tecnologias avançadas que visam reduzir significativamente as emissões de carbono. Estas tecnologias podem incluir o uso de fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, para alimentar os processos industriais, em vez de depender exclusivamente de combustíveis fósseis. Além disso, métodos como a [Captura e Armazenamento de Carvão \(CCS\)](#) são explorados para mitigar as emissões de [CO2](#) durante a produção de aço.

Abrange, também, a adoção de práticas de economia circular. Isso significa maximizar a eficiência dos recursos ao reutilizar materiais e reduzir o desperdício ao longo do ciclo de vida do produto siderúrgico. Exemplos incluem o uso de sucata de aço reciclado como matéria-prima e a implementação de processos de fabricação mais eficientes que consomem menos água e energia.

Além dos benefícios ambientais diretos, o “aço verde” também pode oferecer vantagens económicas às empresas siderúrgicas. À medida que governos e consumidores procuram produtos mais sustentáveis, há uma crescente oportunidade de mercado para o aço produzido com baixo impacto ambiental. Isso pode resultar numa maior competitividade no mercado global e fortalecer a reputação das empresas como líderes em responsabilidade ambiental.

Em resumo, a sustentabilidade e o “aço verde” estão intrinsecamente ligados à capacidade da indústria siderúrgica de adotar práticas inovadoras e tecnologias limpas. Ao avançar nessa direção, as empresas não apenas contribuem para a redução das emissões globais de gases de efeito estufa, mas também posicionam-se como agentes de mudança positiva em direção a uma economia mais sustentável e resiliente.

4.1 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

O aço tem o potencial de se tornar um material bastante sustentável, pois possui uma longa durabilidade, é extremamente resistente e de fácil reciclagem. Contudo, devido à dependência do coque (produzido pelo aquecimento do carvão a altas temperaturas) como matéria-prima essencial e dos combustíveis fósseis nas operações, a produção de aço é um processo altamente intensivo em energia (Climate Science Ltd, 2022).

Por cada tonelada de aço produzida, são emitidas cerca de 1,8 toneladas de CO₂. Isto representa um grande desafio para as alterações climáticas, tendo em conta a dimensão da indústria siderúrgica; para ilustrar, em 2019 foram produzidas cerca de 1880 milhões de toneladas de aço.

A Figura 14 ilustra a evolução da procura e da intensidade energética na produção de aço entre 2000 e 2018, destacando o uso de diferentes fontes de energia, como carvão, gás, eletricidade, petróleo e bioenergia. A procura energética total aumentou ao longo deste período, enquanto a intensidade energética apresentou uma leve queda, indicando ganhos de eficiência no setor. O carvão permanece a principal fonte de energia, mas o gráfico também mostra uma presença crescente de eletricidade e bioenergia, sugerindo uma transição gradual para fontes mais sustentáveis.

Infelizmente, o problema não se limita às emissões de CO₂. A produção de aço também gera outros compostos e poluentes prejudiciais, como CO, N₂O e SO_x, que contribuem para a chuva ácida, afetando o solo e a vegetação. Além disso, o aquecimento do coque no alto-forno emite naftalina, uma substância considerada potencialmente cancerígena (Climate Science Ltd, 2022).

Para alinhar-se com as metas de neutralidade carbónica (*net-zero*) até 2050, a intensidade de CO₂ do aço precisaria de diminuir em média 4% ao ano até 2030. A tendência atual não acompanha esta trajetória de redução. Por isso, são essenciais mudanças urgentes para descarbonizar a indústria.

A Figura 15 mostra a trajetória das emissões de CO₂ na indústria do aço entre 2015 e 2050, comparando dois cenários: a trajetória atual (a laranja) e o caminho necessário para limitar o aquecimento global a menos de 2 °C (a verde). No cenário atual, as emissões de CO₂ aumentam progressivamente, chegando perto de 4 GtCO₂ e em 2050, o que sugere que, sem intervenções significativas, as emissões continuarão a crescer. Por outro lado, o caminho compatível com a meta climática de 2 °C indica uma queda acentuada nas emissões, chegando a menos de 1 GtCO₂ em 2050.

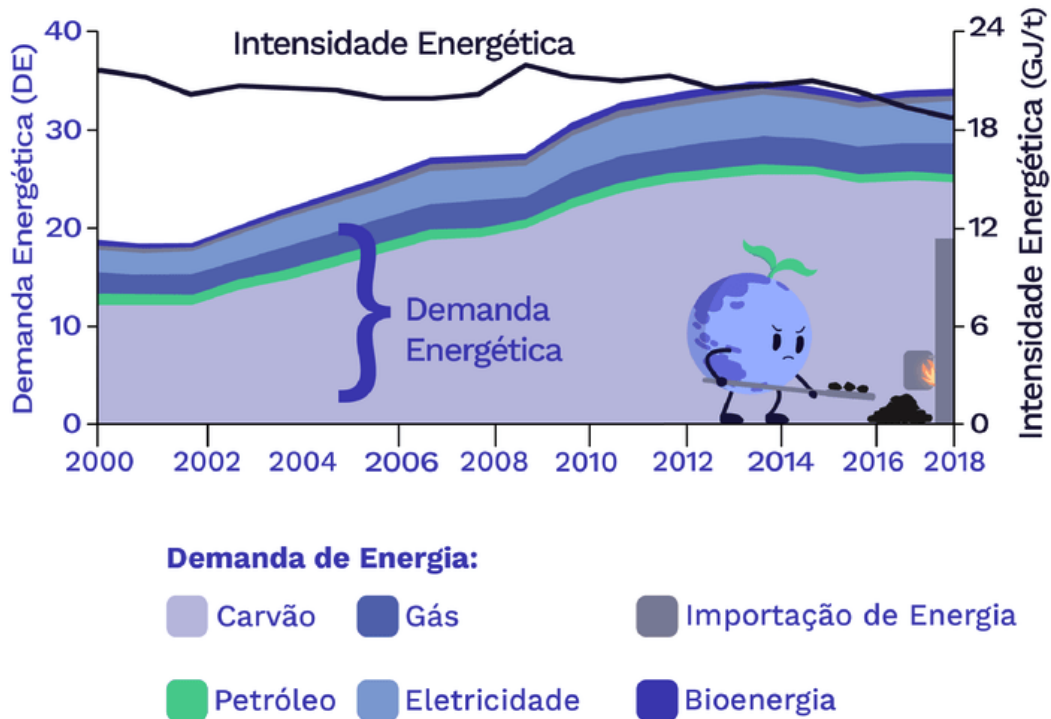


Figura 14: Procura e intensidade energética de aço entre 2000 e 2018. Retirado de Climate Science Ltd, 2022

Isso evidencia a necessidade urgente de adotar soluções tecnológicas e políticas de mitigação para alinhar a produção de aço às metas climáticas globais.

O termo “aquecimento global” refere-se ao aumento da temperatura média da Terra, principalmente causado pelo aumento do efeito estufa, que é intensificado pela queima de combustíveis fósseis. Esse fenómeno representa grandes riscos ambientais para os habitantes do planeta. Em novembro de 2019, a [Organização Meteorológica Mundial \(OMM\)](#) publicou um relatório importante sobre o estado do clima global (World Meteorological Organization, 2019).

Desde 1950, as atividades humanas levaram a aumentos drásticos nas concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), que é o principal GEE. Esse gás tem um tempo de residência na atmosfera de 50 a 200 anos, com 20–60% dele permanecendo no ar por mil anos ou mais. As concentrações de CO_2 aumentaram de 330 partes por milhão (ppm) em 1975 para cerca de 430 ppm atualmente. A OMM confirmou que a queima de combustíveis fósseis é a principal causa desse aumento.

O [Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas \(IPCC\)](#) afirmou na sua avaliação de 2013 que é “extremamente provável” que as atividades humanas sejam

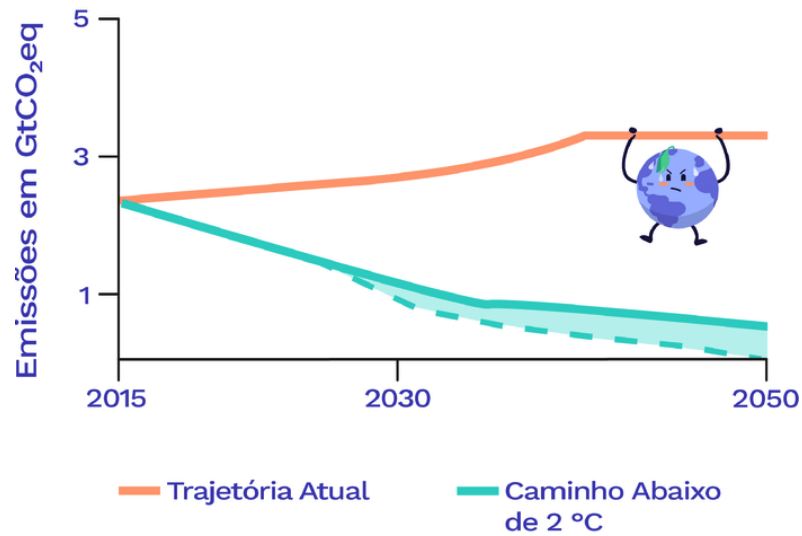


Figura 15: Trajetória das emissões de CO₂ do aço. Retirado de Climate Science Ltd, 2022

a principal causa do aquecimento global observado desde meados do século XX. Essas mudanças nas concentrações de GEE afetam o balanço energético do sistema climático global, resultando em eventos climáticos extremos, que têm impactos significativos na biosfera e nas vidas humanas em todos os continentes. O nível médio global do mar continua a subir, e a extensão do gelo marinho no Ártico e na Antártida está bem abaixo da média. A OMM destacou que a humanidade não está no caminho certo para atingir as metas climáticas e limitar o aumento da temperatura atmosférica a 1,5-2 °C, conforme recomendado no Acordo de Paris de 2015 sobre as mudanças climáticas (World Meteorological Organization, 2019).

O Acordo de Paris de 2015 visa manter as temperaturas “bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais” e esforçar-se para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C. No entanto, espera-se que os compromissos nacionais resultem num aquecimento de cerca de 2,7 °C até 2100. Portanto, o mundo ainda enfrenta um desafio significativo para reduzir ainda mais as emissões de GEE e alinhar o aquecimento global com as aspirações do Acordo de Paris. O IPCC, no seu recente relatório especial sobre as implicações de manter as temperaturas em 1,5 °C, argumentou que tecnologias de remoção de CO₂ serão necessárias para compensar as emissões residuais de GEE e retornar o aquecimento global para 1,5 °C após um pico por volta de 2030. A humanidade precisaria então tomar medidas significativas para reduzir essas emissões a zero entre 2050 e 2070.

Diante desse desafio climático, o Acordo de Paris de 2015 enfatizou a necessidade de alcançar um caminho de transição para emissões líquidas zero de GEE. O Reino

Unido estabeleceu uma meta juridicamente vinculativa em junho de 2019 para atingir emissões líquidas zero até 2050. Outros países na Europa, como Noruega, Finlândia, Islândia e Suécia, adotaram metas ainda mais rigorosas, com prazos entre 2030 e 2045, aproveitando os seus recursos energéticos de baixo carbono. As maiores nações europeias, como França, Alemanha, Itália, Espanha e Holanda, seguiram recentemente o exemplo do Reino Unido ao definir uma data-alvo para 2050 ou apoiar a sua implementação em toda a [União Europeia \(UE\)](#). Em 4 de março de 2020, a Comissão Europeia propôs consagrar uma meta de neutralidade climática para 2050 na sua primeira Lei Climática Europeia, como parte de um Pacto Ecológico Europeu mais amplo (World Meteorological Organization, 2019).

4.2 DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR SIDERÚRGICO

O setor siderúrgico global é um dos maiores emissores de [GEE](#), logo atrás do setor do cimento, devido à sua forte dependência de combustíveis fósseis. Nos últimos 20 anos, a produção de aço dobrou, resultando numa duplicação das emissões diretas de [GEE](#) relacionadas a essa indústria, conforme dados da [Agência Internacional de Energia \(AIE\)](#) (2020). Por isso, é crucial encontrar maneiras de reduzir essas emissões, e daí surgiu a ideia do “aço verde”.

O aço é essencial para grandes indústrias como construção e automóvel, e a procura por ele poderá crescer 40% até 2050, ao mesmo tempo, em que enfrenta a necessidade de reduzir emissões. Empresas estão a buscar alternativas ao aço, como o alumínio, e comprometendo-se a alcançar emissões líquidas zero de [GEE](#) até 2050. Isso tem impulsionado iniciativas internacionais, como o Projeto de Metodologia *Net Zero Steel Pathway*, que define princípios para orientar o setor siderúrgico na redução das suas emissões (World Meteorological Organization, 2019).

O “aço verde” é uma solução de longo prazo para reduzir as emissões da produção de aço. Ele refere-se a produtos siderúrgicos fabricados com processos que emitem menos [GEE](#), ao contrário de produtos com maior teor de carbono. Essa tecnologia foca especificamente na redução das emissões de [GEE](#), diferenciando-se do “aço sustentável”, que também aborda eficiência energética, economia circular e redução de poluentes.

É importante destacar que o “aço verde” não deve ser confundido com o “Aço Responsável”, que promove a produção responsável de produtos siderúrgicos com base em princípios como direitos laborais e gestão ambiental. Estas iniciativas são

fundamentais para tornar a indústria siderúrgica mais sustentável e alinhada com metas ambientais globais (World Meteorological Organization, 2019).

A Figura 16 projeta as emissões de CO₂ da produção de aço até 2050, destacando os impactos de diferentes medidas de mitigação. No cenário BAU (*Business As Usual*), as emissões atingiriam 2,8 Gt de CO₂. A adoção de maior eficiência no uso de materiais e melhorias tecnológicas poderia reduzir essas emissões em 0,6 Gt e 0,2 Gt, respectivamente, resultando em 2,0 Gt no cenário de desenvolvimento sustentável sem novas tecnologias disruptivas. No entanto, para alcançar o cenário de emissões líquidas zero da AIE, mais 1,8 Gt de CO₂ precisariam ser cortadas, o que dependeria de inovações tecnológicas significativas na indústria siderúrgica.

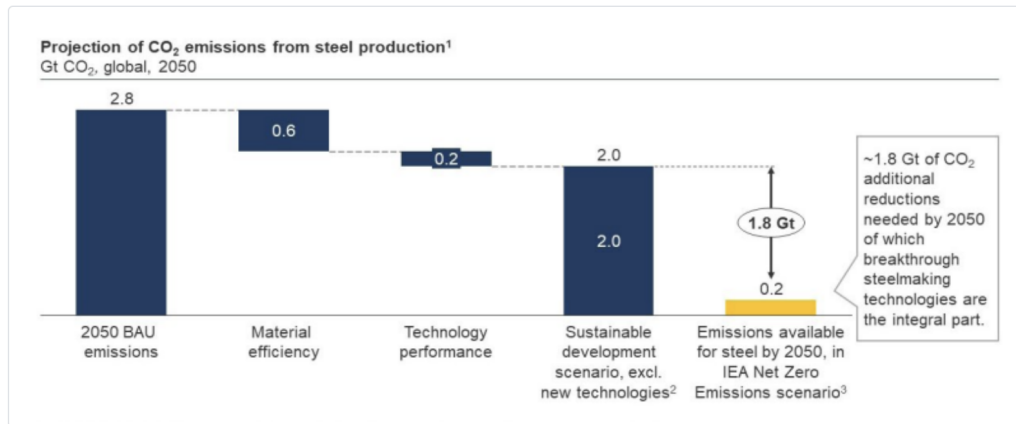


Figura 16: A indústria siderúrgica exigirá novas tecnologias para atingir metas climáticas ambiciosas. Retirado do Ellerbeck, 2022

4.3 O DESAFIO DOS CUSTOS NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE AÇO VERDE

Um dos maiores desafios para tornar a produção de aço sustentável é o custo. A produção de aço ecológico, seja por meio da captura de carbono ou da utilização de hidrogénio, pode custar entre 20–30% até 50% mais caro do que a produção convencional. Isso deve-se principalmente aos altos custos de capital das tecnologias de captura de carbono e dos eletrolisadores, apesar das projeções de redução de custos com a maior adoção dessas tecnologias. A viabilidade económica do aço verde dependerá se os custos adicionais poderão ser repassados aos consumidores ou sustentados pelo mercado. Um estudo sueco indica que a produção de aço utilizando hidrogénio pode ser competitiva com um preço de carbono entre 34–68 euros por

tonelada de CO₂ e custos de eletricidade de 40 euros/MWh (H2FUTURE Green Hydrogen, 2024).

Vale destacar que os custos futuros dependerão da rapidez com que a eficiência energética pode ser melhorada e das reduções nos custos de capital, além da oportunidade de comercializar o excesso de oxigênio gerado como subproduto no processo de produção de hidrogênio.

O aço é uma mercadoria comercializada internacionalmente, enfrentando intensa concorrência tanto no mercado interno quanto no externo. Um produto *premium* de aço verde competiria diretamente com o seu equivalente tradicional, que é mais barato e mais intensivo em carbono. Devido às margens de lucro estreitas, os fabricantes de aço verde correm o risco de perder participação de mercado, colocando os primeiros adotantes em desvantagem, a menos que possam competir através da diferenciação do produto em vez do custo.

No entanto, diferenciar o aço verde é um desafio, pois, apesar das suas diferenças significativas em termos de emissões, ele não apresenta distinções visuais relativamente aos aços tradicionais. Isso dificulta o estabelecimento de um mercado para o aço verde, onde são necessárias medições, relatórios e verificações rigorosas, além de padrões e processos de certificação bem definidos, para mitigar o risco de *greenwashing*, termo que designa quando algumas empresas ou organizações promovem uma imagem ambientalmente responsável e sustentável, mas na realidade não fazem mudanças significativas nas suas práticas ou produtos (H2FUTURE Green Hydrogen, 2024).

Apesar dos desafios, ao contrário das fontes de energia renovável que se misturam na rede elétrica e não podem ser distinguidas de outras fontes fósseis uma vez integradas, os produtos de aço verde podem ser rastreados até fabricantes específicos. Além disso, assim como ocorre com as renováveis, pode haver uma disposição entre os consumidores finais para pagar por produtos mais ecológicos, embora o quanto de prêmio estariam dispostos a pagar ainda precise ser determinado.

A metodologia de *Willingness To Pay (WTP)* tem sido amplamente utilizada por empresas para prognosticar taxas de adoção de tecnologias inovadoras e novos produtos (H2FUTURE Green Hydrogen, 2024). Contudo, no contexto específico do aço verde, a determinação da WTP do consumidor final apresenta desafios significativos, atribuíveis a múltiplos fatores complexos:

Primeiro, não é fácil definir quem é o consumidor final do aço, já que ele compõe apenas uma parte de muitos produtos finais. De maneira geral, a cadeia de valor de um produto industrial como o aço consiste em três etapas:

1. Fabricante do produto (o siderúrgico, neste caso);
2. Consumidor industrial (a montadora de automóveis ou empresa de construção);
3. Utilizador final (indivíduos comprando veículos ou casas).

Baseando-se na indústria da construção, apesar do aumento significativo nos custos do aço e do cimento devido à integração da captura e armazenamento de carbono (CCS) nas fábricas, o impacto final no custo de construção de uma ponte é pequeno. O estudo mostra que o uso de aço e cimento mais ecológicos, fabricados com CCS, resultaria num aumento de apenas 1% no custo total da ponte, ao mesmo tempo que reduziria mais de 50% das emissões provenientes da produção e uso desses materiais (Subraveti et al., 2023).

A produção de hidrogénio limpo em grande escala exigirá bilhões de dólares de investimento em geração de energia renovável. No entanto, essa produção continua a ser uma parte fundamental da ambição da UE de atingir emissões líquidas zero até 2050. O plano *REPowerEU* da UE estabeleceu uma meta de aumentar substancialmente o uso de hidrogénio renovável até 2030 (Singh e Rout, 2018).

A maior siderúrgica da Europa, a ArcelorMittal, informou ao *Financial Times* que descarbonizar as suas operações no continente, consoante as metas da UE, pode custar até 40 mil milhões de dólares (Singh e Rout, 2018).

Há relatos de que a China se comprometeu a alcançar a neutralidade de carbono até 2060, o que exigirá a redução das emissões das suas siderúrgicas, que são responsáveis por um terço da sua poluição total de CO₂.

A Figura 17 apresenta a distribuição global da produção de aço, com destaque para a posição dominante da China, que contribui com 52,9% da produção total. As outras regiões do mundo têm uma participação significativamente menor, como é o caso da UE (7,8%), a região do Acordo Estados Unidos-México-Canadá (USMCA) com 6,0%, e a Índia com 6,1%. A figura também mostra a contribuição de outras regiões, como a Rússia e outras nações da Comunidade de Estados Independentes (5,4%), e outros países asiáticos, europeus e mundiais, ilustrando a concentração da produção de aço em determinadas áreas geográficas, em particular na China, reforçando a sua importância no mercado global deste metal estratégico.

O preço do hidrogénio verde, por exemplo, pode variar entre 1 €/kg e 5 €/kg, afetando diretamente o custo final do aço produzido. Estudos indicam que, em 2050, o aço produzido com hidrogénio pode ser comparável em custo ao aço produzido atualmente, ou até 60% mais caro, dependendo das condições do mercado energético (Somers, 2022).

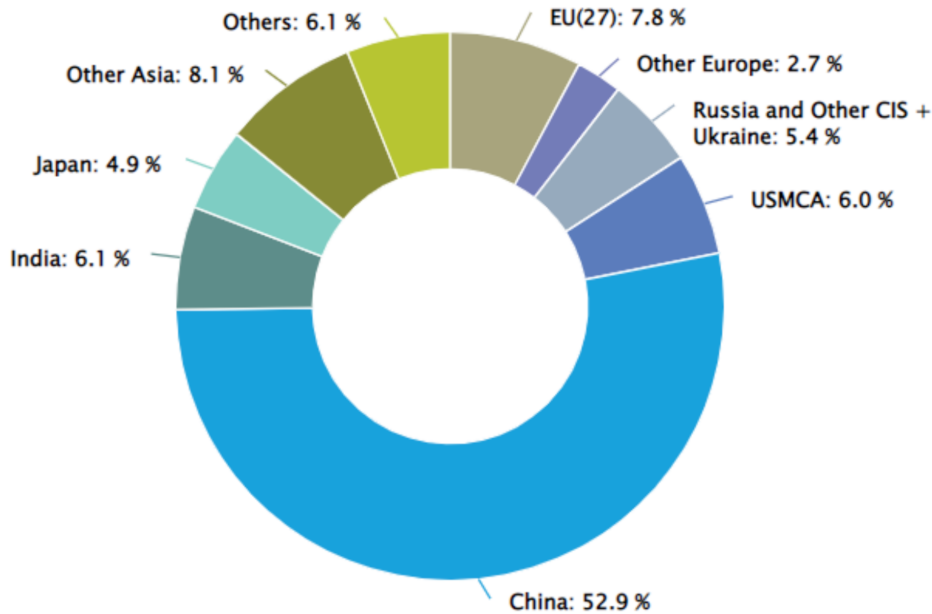


Figura 17: Percentagem da produção de aço em alguns países. Retirado de Worldsteel, 2022

Além disso, a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura, como redes de eletricidade renovável e hidrogénio, representa um desafio significativo. Estima-se que o setor siderúrgico precisará de até 100 mil milhões de euros em investimentos para a comercialização das novas tecnologias e substituição das instalações de produção atuais (Somers, 2022).

4.4 CONCORRÊNCIA

Os produtos de aço verde enfrentam concorrência em quatro níveis diferentes: competição local, necessidade de diferenciação, concorrência de importações e a competição com outros materiais. O aço verde competirá com o aço tradicional, o qual é mais barato. Se não houver regulamentação adequada, diferentes métodos de produção de aço verde também competirão entre si. Por exemplo, o aço produzido com tecnologias caras de baixa emissão (como CCS ou hidrogénio) enfrentará mais pressão para reduzir emissões do que o aço reciclado, que é mais barato e usa eletricidade renovável. Portanto, é importante distinguir claramente entre aço verde produzido por rotas primárias (nova produção) e secundárias (reciclagem).

É crucial diferenciar o aço verde reciclado do produzido pela rota primária, não apenas por razões económicas e logísticas, mas também para uma contabilidade justa de emissões. O aço reciclado tem uma pegada de carbono inerente que os

produtores não são responsáveis, colocando os produtores primários em desvantagem se ambos forem avaliados pelos mesmos padrões de emissão.

Metodologias de [Avaliação do Ciclo de Vida \(ACV\)](#) devem ser adotadas para refletir transparentemente o carbono incorporado nos aços, possibilitando uma comparação justa. O aço verde também enfrentará concorrência do aço importado, especialmente se este não estiver sujeito aos mesmos padrões ecológicos. Regulamentos nacionais ou regionais podem ajudar, implementando ajustes de carbono nas fronteiras para importações ou oferecendo aos produtores locais de aço verde acesso a mercados específicos. O risco de o aço importado competir com o aço verde local varia conforme a região.

O aço verde competirá indiretamente com materiais substitutos, como cimento na construção, alumínio no fabrico de automóveis, plástico na embalagem e cerâmica no fabrico de motores. A regulamentação deve ser cuidadosamente planejada para evitar consequências indesejadas, como o deslocamento para materiais mais baratos e menos intensivos em carbono. Para mobilizar investimentos em aço verde, as políticas devem considerar a capacidade da indústria siderúrgica de fornecer aço verde a custos acessíveis, combinando regulamentações de produção e consumo.

A indústria siderúrgica europeia está sob forte pressão devido à concorrência internacional, especialmente da China e Índia, onde os custos de produção são menores, mas com impactos ambientais maiores. A Europa, ao focar na descarbonização, pode enfrentar o desafio de equilibrar competitividade com sustentabilidade (Somers, 2022).

4.5 ESTRATÉGIA PARA AUMENTAR A PROCURA DO AÇO VERDE

As intervenções governamentais podem ser cruciais para promover a adoção de aço verde, pois envolve a inclusão de requisitos mínimos de aço verde em contratos públicos, o que poderia inicialmente restringir a produção a fornecedores específicos e limitar o consumo a projetos apoiados pelo governo. No entanto, ao longo do tempo, essa prática poderia tornar-se mais disseminada à medida que os produtores adaptam-se para evitar ineficiências operacionais.

Além disso, na ausência de intervenções governamentais diretas, o mercado de aço verde poderia permanecer confinado a nichos de consumidores conscientes do meio ambiente, dispostos a pagar um prêmio por produtos sustentáveis. Isso pode beneficiar empresas que já têm uma oferta diferenciada de produtos siderúrgicos

e uma base de consumidores fiel. No entanto, para alcançar uma descarbonização mais ampla da indústria, é essencial que haja apoio político suficiente para expandir a adoção de aço verde para além desses nichos.

A certificação desempenha um papel crucial no estímulo à procura por aço verde, proporcionando transparência e confiança aos consumidores quanto à origem ecológica dos produtos. Estabelecer normas claras e fiáveis para a rotulagem e rastreabilidade do aço verde é fundamental para garantir que os consumidores façam escolhas informadas.

A recente mobilização da indústria siderúrgica europeia para atingir emissões líquidas zero até 2050 demonstra um impulso significativo na direção do aço verde. O desenvolvimento de mercados para produtos de aço de baixo carbono será crucial para acelerar essa transição. A UE tem a oportunidade de liderar esse movimento ao criar regulamentações e padrões para o aço verde, especialmente por meio de políticas de compras públicas sustentáveis, que incentivem o uso de materiais com baixo impacto ambiental (Somers, 2022).

CONCLUSÕES

O conceito de aço verde representa não apenas uma evolução tecnológica na produção siderúrgica, mas também um passo crucial em direção à sustentabilidade ambiental global. A necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado a indústria siderúrgica a buscar alternativas mais limpas e eficientes. O aço verde surge como uma resposta promissora para enfrentar esse desafio, adotando processos inovadores que minimizam o impacto ambiental sem comprometer a qualidade e a eficiência do produto final.

A transição para o aço verde não é apenas uma mudança tecnológica, mas também uma transformação cultural e organizacional para as empresas siderúrgicas. Requer investimentos significativos em investigação e desenvolvimento, infraestrutura adaptada e um compromisso firme com práticas mais sustentáveis. Além disso, a colaboração entre governos, empresas e sociedade civil é essencial para superar os desafios econômicos e regulatórios associados à implementação em larga escala dessas tecnologias disruptivas. No setor da construção civil, o aço verde oferece uma oportunidade única de reduzir a pegada de carbono dos edifícios, promovendo projetos mais sustentáveis desde a fase inicial de construção até o ciclo de vida completo das estruturas. Embora enfrentando desafios como custos iniciais mais elevados e complexidades na cadeia de suprimentos, os benefícios a longo prazo em termos de durabilidade, eficiência energética e reciclabilidade posicionam o aço verde como um material de escolha para construções que buscam atender às procuras crescentes por sustentabilidade.

À medida que avançamos para um futuro onde a descarbonização se torna imperativa, o aço verde não é apenas uma opção viável, mas uma necessidade urgente. A colaboração internacional, a inovação contínua e o compromisso com práticas industriais responsáveis são fundamentais para alcançar as metas globais de redução de emissões e criar um ambiente construído mais sustentável para as gerações futuras.

Portanto, o aço verde representa não apenas uma transformação tecnológica na indústria siderúrgica, mas também uma mudança de paradigma em direção a uma economia mais verde e resiliente. O futuro da produção de aço está intrinsecamente

ligado à capacidade de adotar essas práticas inovadoras e sustentáveis, garantindo um impacto positivo tanto no meio ambiente quanto na sociedade como um todo.

Esta dissertação teve por objetivo mostrar o que é, o estágio de desenvolvimento, as vantagens, desvantagens e as perspectivas futuras do aço verde, que visa descarbonizar a indústria siderúrgica. O ainda incipiente uso do aço verde na construção civil também foi abordado, pese embora o pequeno número de trabalhos publicados nesta área de conhecimento. Mesmo com a dificuldade de bibliografia e casos de estudos sobre o aço verde na construção, julga-se importante que conteúdos como os abordados neste trabalho contribuam para a uma maior compreensão do produto e os seus processos e por consequência contribuam para o debate e a melhoria da descarbonização da indústria do aço.

BIBLIOGRAFIA

- Broadbent, Clare (2016). «Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy». Em: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, pp. 1658–1665.
- Climate Science Ltd (2022). *Aço sustentável: O que as mudanças climáticas tem a ver com o aço?* <https://climatescience.org/ptBR/advanced-steel-climate> [Acedido a: 20.09.2024].
- Dassault Systèmes SE (2022). *Green Steel: Can We Make Heavy Industry Have a Lighter Impact?* https://www.3ds.com/sustainability/sustainable-production/green-steel?_gl=1*5fqqa*_ga*MzYyMTQzOTQyLjE3MTQyNDM5Mjg.*_ga_DYJDKXYEZ4*MTcxNDIOMzkyNy4xLjAuMTcxNDIOMzkyOC42MC4wLjA [Acedido a: 20.09.2024].
- Ellerbeck, Stefan (jul. de 2022). URL: <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/green-steel-emissions-net-zero/>.
- (2024). *Decarbonizing steelmaking for a net-zero future*. URL: <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/>.
- European Environment Agency, EEA (2021). *CO₂-emission intensity from electricity generation*. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/sds/co2-emission-intensity-from-electricity-generation-5> [Acedido a: 20.09.2024].
- Finnveden, Göran et al. (2009). «Recent developments in Life Cycle Assessment». Em: *Journal of Environmental Management* 91.1, pp. 1–21. ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>.
- H2FUTURE Green Hydrogen, H2FUTURE (2024). *H2FUTURE — Technology*. <https://www.h2future-project.eu/> [Acedido a: 20.09.2024].
- Havit Steel Structure (2021). *Why Promote Green Steel Building?* <https://havitsteelstructure.com/green-steel-building/> [Acedido a: 20.09.2024].
- Hybrit, Hybrit Development AB (2018a). «Fossil-Free Steel—Summary of Findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017». Em: pp. 1–20. URL: <https://www.hybritdevelopment.se/wp-content/uploads/2021/02/Hybrit-broschure-engelska.pdf>.

- Hybrit, Hybrit Development AB (2018b). «Green platforms». Em: *HYBRIT Development AB*, pp. 1–20. URL: <https://www.hybritdevelopment.se/wp-content/uploads/2021/02/Hybrit-broschure-engelska.pdf>.
- Iberdrola (2021). *O aço verde: um material para iniciar sua descarbonização industrial e aumentar as fronteiras da eletrificação*. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/aco-verde> [Acedido a: 20.09.2024].
- International Energy Agency, IEA (2020). *Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking*. OECD Publishing.
- Jovičević-Klug, Matic et al. (2024). «Green steel from red mud through climate-neutral hydrogen plasma reduction». Em: *Nature* 625.7996, pp. 703–709.
- Leeson, Duncan et al. (2017). «A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources». Em: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 61, pp. 71–84.
- Li, Yuan e Lei Zhu (2014). «Cost of energy saving and CO2 emissions reduction in China's iron and steel sector». Em: *Applied Energy* 130, pp. 603–616.
- Lira, Camila de (2022). *Aço verde na construção tem potencial para descarbonizar economia*. <https://habitability.com.br/aco-verde-na-construcao-tem-potencial-para-descarbonizar-economia/> [Acedido a: 20.09.2024].
- Lisienko, VG et al. (2016). «Types of greenhouse gas emissions in the production of cast iron and steel». Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 150. 1. IOP Publishing, p. 012023.
- McAdam, Rodney e Leonard Brown (2001). «Strategic alignment and the supply chain for the steel stockholder sector: an exploratory case study analysis». Em: *Supply Chain Management: An International Journal* 6.2, pp. 83–95.
- Muslemani, Hasan et al. (2021). «Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products». Em: *Journal of Cleaner Production* 315, p. 128127.
- Quader, M Abdul et al. (2015). «A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, pp. 594–614.
- Rizzo, Ernandes Marcos Silveira (2006). *Introdução aos processos de refino primário dos aços nos convertedores a oxigênio*. ABM, p. 118.
- Scheyrer, Jonas (2023). *Green steel — the hope of a low-carbon construction industry?* <https://www.sustamize.com/blog/green-steel-the-hope-of-a-low-carbon-construction-industry> [Acedido a: 20.09.2024].

- Singh, Jitesh Kumar e Arun Kumar Rout (2018). «Advances in green steel making technology-a review». Em: *American Journal of Materials Engineering and Technology* 6.1, pp. 8–13.
- Somers, Julian (2022). *Technologies to decarbonise the EU steel industry*. Rel. téc. EUR 30982 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: [10.2760/069150](https://doi.org/10.2760/069150). URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC127468>.
- Souza Oliveira, Milena de e Rogério José da Silva (2022). «Aço verde: análise teórica da viabilidade da redução direta de hidrogênio na indústria siderúrgica». Em: *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica*.
- Stegra, tidigare H2GS AB (H2 Green Steel) (2024). *H2 Green Steel — Our Boden plant*. <https://www.h2future-project.eu/en/technology> [Acedido a: 20.09.2024].
- Subraveti, Sai Gokul et al. (2023). «Is carbon capture and storage (CCS) really so expensive? An analysis of cascading costs and CO2 emissions reduction of industrial CCS implementation on the construction of a bridge». Em: *Environmental Science & Technology* 57.6, pp. 2595–2601.
- TheCivilEngineer.org (2024). *Green Steel Production: The Future of Civil Engineering*. <https://www.thecivilengineer.org/news/green-steel-production-the-future-of-civil-engineering> [Acedido a: 20.09.2024].
- Vogl, Valentin, Max Åhman e Lars J. Nilsson (2018). «Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking». Em: *Journal of Cleaner Production* 203, pp. 736–745. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618326301>.
- World Meteorological Organization (2019). *State of the Climate in 2018 shows accelerating climate change impacts*. <https://web.archive.org/web/20190409034534/https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-climate-2018-shows-accelerating-climate-change-impacts> [Acedido a: 20.09.2024].
- World Steel Association, Worldsteel (2017). «Life cycle inventory methodology report for steel products». Em: *World Steel Association, Brussels*.
- Worldsteel, World Steel Association AISBL (2022). *World Steel in Figures 2021*. <https://worldsteel.org/world-steel-in-figures-2021/> [Acedido a: 20.09.2024].