

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**IMPACTO DA SUCATA FERROSA EM QUALIDADE,
SUSTENTABILIDADE E CUSTOS: Estudo de Caso do Aço
Ferramenta H13**

MARIANA SANTOS PEREIRA

SÃO CARLOS – SP

2025

**IMPACTO DA SUCATA FERROSA EM QUALIDADE,
SUSTENTABILIDADE E CUSTOS: Estudo de Caso do Aço
Ferramenta H13**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de São Carlos, como requisito
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.^a Dra. Danielle Cristina
Camilo Magalhães

Co-Orientador: Prof. Dr. Conrado Ramos
Moreira Afonso

São Carlos – SP

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
Telefones: 16 –3351-8244 e 3351-8246
Endereço eletrônico: demachef@ufscar.br
Rodovia Washington Luís, km 235 – Caixa Postal 676
CEP 13565-905 – São Carlos – SP - Brasil



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Mariana Santos Pereira

RA: 769760

TÍTULO: Impacto da sucata ferrosa em qualidade, sustentabilidade e custos: estudo de caso do aço ferramenta H13

ORIENTADORA: Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso

DATA/HORÁRIO: 11/07/2025, 10h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães	10,0	10,0
Profa. Dra. Andrea Madeira Kliauga	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Profa. Dra. Danielle Cristina Camilo Magalhães

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIELLE CRISTINA CAMILO MAGALHAES
Data: 11/07/2025 11:44:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Andrea Madeira Kliauga

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDREA MADEIRA KLAUGA
Data: 22/07/2025 15:57:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha mãe, símbolo de força, resiliência, coragem e afeto. À mulher mais forte que conheço, e que me inspira a ser uma pessoa melhor todos os dias.

AGRADECIMENTO

Registro aqui meu mais profundo e sincero agradecimento a todos que cruzaram meu caminho durante os últimos anos. Amigos, colegas, companheiros e desconhecidos. Acredito que todos causam um impacto por onde passam, e cada situação vivida molda quem somos.

Gostaria de agradecer aos meus suportes diários, minha mãe, meu irmão, meu namorado e meu pai. Todos os familiares que de certa forma me encorajaram ou foram importantes para mudar o meu ponto de vista ao longo dos anos.

Agradeço também ao professor Conrado, meu orientador de Iniciação Científica por quase três anos, por todos os ensinamentos e por todas as oportunidades. Meu muito obrigada também a todos os mestrandos e doutorandos do DEMa que me auxiliaram, os técnicos dos laboratórios e demais professores, e à FAPESP pelos três financiamentos concedidos.

Por fim, quero agradecer aos companheiros de trabalho da Villares Metals SA, principalmente da Área de Matéria-Prima, que no último ano foram minha família e me ensinaram mais do que qualquer escola poderia. Agradeço ainda minha orientadora nesse trabalho, professora Danielle por todo o suporte e conselhos nesse momento tão importante.

Muito obrigada.

“Humankind faces a vicious circle: a shift to renewable energy will replace one non-renewable resource (fossil fuel) with another (metals and minerals).”

VIDAL, 2013

RESUMO

O aço é um dos materiais de engenharia mais importantes do mundo, servindo como base para o desenvolvimento de sociedades e nações, mas também é responsável por grande parte das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE). Com o surgimento da técnica de produção de aço via Forno Elétrico a Arco, fez-se possível a utilização de sucatas ferrosas como matéria-prima em maior escala, permitindo o aumento da economia circular. A crescente busca por essa matéria-prima torna necessária a discussão sobre a relação entre disponibilidade e qualidade, pois as sucatas advêm de diferentes fontes e podem passar por diferentes separações e classificações. O presente trabalho tem como objetivo estudar impactos da utilização de sucata ferrosa em aços como o H13 produzidos via rota elétrica de fusão, em termos de qualidade de matéria-prima, produto, indicadores de sustentabilidade e custos. Para essa análise, foi realizado um estudo de caso relacionado a um defeito superficial em barras de aço ferramenta H13 produzido na Villares Metals. Amostras de barras desse aço foram analisadas via microscopia óptica e micro-analisador de sonda eletrônica, para caracterização do defeito, e também foram explorados dados de energia absorvida no impacto através do ensaio Charpy-V. Foram estudados, de forma comparativa, indicadores de consumo energético e de emissão de GEEs para oito indústrias do setor siderúrgico, e depois avaliados possíveis cenários de utilização de sucata e seu impacto em termos de emissões relacionadas ao escopo 3. Por fim, foi feita uma comparação em termos econômicos nos mesmos cenários, observando-se as diferenças de custos atrelados às matérias-primas que podem ser utilizadas em substituição à sucata ferrosa para a produção do aço H13. É possível dizer que a qualidade da sucata afeta diretamente a qualidade do produto, podendo levar a defeitos como *hot shortness* em aços ferramentas H13. Também pode-se afirmar que a matriz elétrica das regiões onde se encontram as usinas impactam fortemente as emissões, e a utilização de uma tonelada de sucata é capaz de diminuir as emissões em até 1,87 t CO_{2eq}. Já para o cenário econômico, encontrou-se uma economia de até R\$ 2.491,00 por tonelada de produto com a utilização de sucatas.

Palavras-chave: Sucata Ferrosa. Aço Ferramenta H13. Sustentabilidade. Qualidade. Reciclagem.

ABSTRACT

Steel is one of the most important engineering materials worldwide, serving as a foundation for the development of societies and nations, but it is also responsible for a significant portion of global Greenhouse Gas (GHG) emissions. The advent of steel production via the Electric Arc Furnace (EAF) has enabled the large-scale use of ferrous scrap as a raw material, thereby increasing the circular economy. The growing demand for this raw material necessitates a discussion on the relationship between its availability and quality, as scrap originates from various sources and undergoes different separation and classification processes. This work aims to study the impacts of using ferrous scrap in steels such as H13 produced via the electric melting route, in terms of raw material and product quality, sustainability indicators, and costs. For this analysis, a case study was conducted on a surface defect in H13 tool steel bars produced at Villares Metals. Samples from these bars were analyzed using optical microscopy and electron probe micro-analyzer to characterize the defect, and data on absorbed impact energy were explored through Charpy V-notch tests. A comparative study of energy consumption and GHG emission indicators was performed for eight companies in the steel sector. Subsequently, potential scenarios for scrap utilization and their impact on Scope 3 emissions were evaluated. Finally, an economic comparison was made across the same scenarios, observing the cost differences associated with raw materials that can be used as substitutes for ferrous scrap in the production of H13 steel. It is possible to state that scrap quality directly affects product quality, potentially leading to defects like hot shortness in H13 tool steels. It can also be affirmed that the electricity mix of the regions where the plants are located strongly influences emissions, and the use of one ton of scrap can reduce emissions by up to 1.87 t CO_{2eq}. In the economic scenario, savings of up to BRL 2,491.00 per ton of product were found with the use of scrap.

Keywords: Ferrous Scrap. H13 Tool Steel. Sustainability. Quality. Recycling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1. INDÚSTRIA SIDERÚRGICA	5
3.1.1. Produção e Metalurgia	6
3.1.2. Sucatas Ferrosas	9
3.1.3. Economia e Sustentabilidade	12
3.2. AÇOS FERRAMENTA	15
3.2.1. Influência de Elementos	18
3.2.2. Desafios Tecnológicos	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1. MATERIAL	23
4.2. ANÁLISES LABORATORIAIS	24
4.3. ANÁLISE DE INDICADORES	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1. QUALIDADE E PRODUTO	27
5.1.1. Microestrutura	28
5.1.2. Energia Absorvida no Impacto	35
5.2. SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA	36
5.2.1. Indicadores de Sustentabilidade	37
5.2.2. Indicadores Econômicos	42
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

O material mais reciclado no planeta é o aço, com uma taxa de reciclagem global estimada em 70%, enquanto a possibilidade de reutilização dos coprodutos gerados nos processos produtivos desse material gira em torno de 97%. Com todo o desenvolvimento tecnológico ao longo do tempo, tem-se que hoje o consumo de energia para a produção do aço é 50% menor do que há 30 anos e, ainda, é possível produzir aços mais resistentes mecanicamente que permitem produtos mais leves, com as mesmas propriedades, economizando material (WORLD STEEL, 2025).

O aço desempenhou um papel fundamental na história, e ainda atuará de forma determinante para o futuro da sociedade, com a população humana tornando-se cada vez mais urbana. Com a expansão dos centros urbanos, aumenta-se a necessidade de produção de materiais como o aço, e junto a isso preocupações com as emissões de gases como CO₂, as mudanças climáticas e a disponibilidade de combustíveis impulsionam a demanda por fontes renováveis de energia (WORLD STEEL, 2025).

A energia sustentável é a base para uma sociedade de baixo carbono, mas requer a fabricação e a construção de diferentes instalações, realizadas com metais cuja produção e extração exigem cada vez mais energia. O aumento da mineração é inevitável, mas a evolução da reciclagem, da substituição e do *design* planejado é necessária. A demanda por metais base – como ferro, cobre e alumínio – tem aumentado anualmente em cerca de 5%, e com essa tendência, estima-se que para os próximos 15 anos será preciso atingir uma produção referente à soma daquela desde o início da humanidade até o ano de 2013 (VIDAL, 2013).

Conforme a demanda aumenta, necessita-se equilibrar a produção de metais e a energia utilizada, otimizando processos e gerenciando recursos globalmente. A maior parte das emissões no setor metalúrgico são provenientes da extração primária e do refino, sendo os minérios reduzidos com o uso de insumos de origem fóssil como coque, ou ainda utilizando-se energia também de origem fóssil, ou não renovável. A transformação de processos majoritariamente lineares – baseados em matérias-primas não sustentáveis, origens fósseis, despejo de resíduos – em etapas circulares – utilização de sucata e reaproveitamento de coprodutos – é um primeiro impulso para reagir ao crescente cenário de emissões do setor. Todavia, a reciclagem para produção de novos metais é limitada, tanto pela disponibilidade global de sucata,

quanto pela mútua contaminação das ligas com sucatas misturadas. A produção de metais a partir de sucata pode ser entre 30% e 95% mais sustentável do que as rotas primárias, mas o gargalo está na oferta dessa matéria-prima, devido à demanda crescente resultante da pressão para descarbonização (RAABE, 2023).

No cenário siderúrgico, tem-se que o mercado de sucata ferrosa é complexo. Isso devido ao fato de esta indústria ser fornecedora de matéria-prima para demais setores, tendo uma complexa rede de suprimentos e de clientes. Um aço produzido em uma usina siderúrgica passa por diferentes processamentos – como estampagem, corte, usinagem – em indústrias diversas, e dessa forma, sucatas são geradas de maneira variada e em múltiplos locais. Tanto a composição química pode variar – já que existem milhares de tipos de aços com composições específicas – quanto o formato e a qualidade em termos de contaminações (óleos, graxas, areia, outros). O processo de fusão e refino dos aços no geral é capaz de remover impurezas provenientes de diferentes matérias-primas que se fazem presentes no metal líquido, mas de forma limitada. O material passa por etapas de oxidação e de desgaseificação, mas existem elementos químicos que, quando presentes, não podem ser removidos e permanecem como residuais no aço reciclado (WORLD STEEL, 2025).

Um exemplo é o cobre, termodinamicamente não favorável à oxidação no banho metálico, e que causa diversos problemas de qualidade na maioria dos aços comerciais. Como é um elemento que não pode ser removido do metal líquido, seu teor é apenas diluído durante a produção com a adição de matérias-primas sem sua presença – maior pureza –, gerando adversidades no processo, tais como aumento do custo do produto e, consumo não programado de matérias-primas de maior qualidade. Indústrias do setor tendem a gerenciar a presença de elementos como esse nas sucatas por meio de inspeções e melhorias nas técnicas de separação (WORLD STEEL, 2025). Além de ser um problema para a qualidade do aço, a presença do cobre em sucatas ferrosas indica a não separação de componentes ricos nesse elemento, limitando sua reciclagem e impactando de forma direta na economia circular dos produtos de cobre, também vital para as sociedades modernas.

O sistema de reciclagem como um todo tem suas imperfeições e limitações, sendo que informações qualitativas sobre as sucatas comercializadas e disponíveis para coleta nem sempre estão disponíveis ou são detalhadas. Como a composição química é informação fundamental para a produção de aços de elevado desempenho, ela estabelece um gargalo para a reutilização de sucatas como matérias-primas no

processo de fusão (HAGEDORN, 2022). Dessa forma, os maiores desafios para aumento do consumo de sucatas – sejam elas sucatas pré- ou pós-consumo – são diretamente relacionados ao domínio sobre a tolerância dos aços a elementos residuais. É necessário um entendimento sobre quais são as influências de diferentes elementos combinadas quimicamente e, também, combinadas com os diferentes processos, o que pode variar para cada tipo de aço (RAABE, 2023).

O presente trabalho discutirá sobre determinadas as influências do uso de diferentes sucatas ferrosas como matéria-prima no processo de produção de aços especiais a partir do forno elétrico a arco – como os aços ferramenta – e quais os impactos em termos de sustentabilidade, economia e qualidade do produto obtido.

A maior motivação partiu do fato de que é crescente a necessidade de ações voltadas para a descarbonização do setor siderúrgico, e que para isso serão necessárias atuações em inúmeras frentes simultaneamente. O aumento da produção de ligas ferrosas como o aço através da rota elétrica com o maior consumo possível de sucata metálica – pensando-se em uma economia circular – só é possível com a disponibilidade de tal matéria-prima. A crescente na produção desse material de engenharia desencadeada pela urbanização e pelo desenvolvimento de diversas nações, não é acompanhada pela geração de sucata, visto que as fontes de aço são bens duráveis que retêm tal material ao longo de décadas.

2. OBJETIVOS

Como objetivo geral, o presente trabalho irá avaliar a importância da sucata ferrosa pós-consumo na produção de aços especiais, com ênfase no aço ferramenta H13, via rota elétrica de fusão, em termos de qualidade da matéria-prima e do produto final, indicadores de sustentabilidade e custos de processo.

Consequentemente, como objetivos específicos tem-se: apresentar a criticidade de misturas e contaminações que ocorrem nas sucatas pós-consumo por meio de um estudo de caso, avaliando a influência dessa matéria-prima na microestrutura e na energia absorvida no impacto Charpy do aço H13 e nos defeitos de processamento; apresentar a diferença da produção via rota elétrica (EAF), em termos de impacto ambiental, quando comparada com a rota primária (BF-BOF); apresentar um exemplo de impacto econômico da produção de aço com e sem sucata; e, por fim, avaliar a criticidade da separação e da disponibilidade de sucata de qualidade para a produção de aços via EAF.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção contém assuntos que servirão de base para a construção do trabalho como um todo. Na primeira parte, tem-se uma contextualização sobre a indústria siderúrgica, uma apresentação sobre a metalurgia direcionada para aciarias elétricas e, então, a descrição de sucatas como matéria-prima, e sua importância em termos de sustentabilidade e economia. Ainda nessa seção, será apresentado o conceito de aços especiais, mais especificamente aços ferramenta, as suas características, classificações e aplicações, a influência de elementos de liga e de elementos residuais e os desafios da reciclagem destas ligas.

3.1. INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

O aço é o material de engenharia mais importante do mundo, sendo crucial em todos os aspectos da vida moderna, de infraestrutura a transporte, de saúde a alimentação. Ao observar o contexto das sociedades atuais, tem-se que quantidades significativas de aço são utilizadas na construção de pontes, edifícios, torres, veículos, eletrodomésticos, equipamentos cirúrgicos etc. Esse material é essencial para desenvolvimento de tecnologias, e para a transição energética, além de ter uma relação direta com industrialização e crescimento populacional, sendo fundamental às economias modernas e tendo papel significativo na qualidade de vida (VIDAL, 2013).

A história do aço se inicia com o ferro. Povos do Egito Antigo e da Mesopotâmia utilizavam ferro proveniente de meteoros como decoração há mais de 4000 anos. O ferro fundido passou a ser produzido a partir de minério por volta de 1800 a.C., na Índia, e o conhecimento se espalhou com o colapso do império Hitita, dando origem, em 1200 a.C., à Idade do Ferro. Ferreiros antigos aqueciam o minério de ferro em fornos a carvão, e notaram mudanças nas propriedades do material em função dos múltiplos aquecimentos e com a conformação mecânica por forjamento. Surge então, um novo material – o aço –, inicialmente utilizado para fabricação de armas e lâminas, as quais eram vistas como itens raros e caros, pois o processo e a qualidade do produto dependiam da habilidade individual dos ferreiros (WORLD STEEL, 2025).

Foi com a primeira Revolução Industrial, no século XIX, que a ascensão desse material metálico teve início. Nos últimos 200 anos, a ciência foi capaz de desvendar os segredos e mistérios do aço, material cuja arte de produção era dominada desde

os mestres artesãos na China e Índia antigas (por volta de 300 a.C.). Atualmente, ferro, carbono e inúmeros outros elementos químicos são combinados em proporções específicas dando origem a mais de 3.500 aços diferentes, que são, então, conformados e tratados termicamente para entregar propriedades pré-definidas e adequadas para cada aplicação. Aproximadamente 75% dos aços modernos foram desenvolvidos nos últimos 20 anos, sendo que novos materiais podem ser mais resistentes mecanicamente e, como consequência, capazes de gerar estruturas até 35% mais leves do que os aços antigos (WORLD STEEL, 2025).

Atualmente, é possível dizer que a indústria de ferro e aço é um indicador inegável do desenvolvimento econômico de uma nação, e que a produção de aço exige aplicação de técnicas constantemente em aperfeiçoamento. Essa é uma indústria que gera globalmente cerca de 2,5 trilhões de dólares em receita (3% PIB global), e é responsável por empregar mais de 6 milhões de pessoas (40 milhões indiretamente). A indústria de ferro e aço produz bens intermediários para outros setores, como automotivo, de construção, naval, dentre outros, e é considerada uma indústria consolidada e com elevada taxa de reciclagem (KIM, 2022).

3.1.1. Produção e Metalurgia

A demanda inicial do aço foi impulsionada por guerras entre impérios na Ásia e na Europa. No século XV esse material havia permeado as civilizações pelo mundo, e, então, ferramentas como serras e machados passaram a ser produzidas com aço, devido sua maior durabilidade. O fato de a produção desse material ser lenta e custosa fez com que a aplicação do aço permanecesse em nichos durante séculos, até que em 1856 foi introduzido o processo Bessemer. Este processo, consiste em um forno de formato oval contendo ferro líquido no qual é injetado ar sob alta pressão, que oxida impurezas e aumenta a temperatura, convertendo ferro-gusa em aço em meia hora. Ainda em 1865, foi introduzido o processo *Open Hearth* (Siemens-Martin), que não era tão rápido, mas resultava em melhor qualidade ao permitir maior controle de temperatura. Assim, diz-se que em duas décadas inventores moldaram a indústria moderna de aço, e com maior disponibilidade devido à produtividade e um material de qualidade, o aço substituiu o ferro em inúmeros componentes (WORLD STEEL, 2025).

No início do século XX, o aço foi analisado sob a lente de um microscópio, e assim a união entre ciência e indústria permitiu uma melhor compreensão da microestrutura e das propriedades dos aços. A industrialização aumentava e a

produção de aço avançava, com o aprimoramento das tecnologias e processos existentes. Um exemplo foi o aperfeiçoamento do processo Bessemer, feito pela então *Vereinigte Österreichische Eisen- und Stahlwerke AG (vöest)* na Áustria, que originou o processo Linz-Donawitz (LD). Nesse processo, é utilizado um conversor a oxigênio, chamado de LD ou também de BOF (*Basic Oxygen Furnace*), logo após o processo no alto forno, e essa é a rota de produção de aço mais utilizada. Posteriormente, com o crescimento do consumo de produtos de aço e o sucateamento deles ao final da vida útil, siderúrgicos recorreram à técnica EAF (*Electric Arc Furnace*, em português Forno Elétrico a Arco), que surgiu no final do século XIX e até a década de 1960 era usada apenas para produção de determinados aços (WORLD STEEL, 2025).

Para se produzir aço, são necessários três processos: redução, refino e conformação. As indústrias desse setor podem ser classificadas em integradas ou semi-integradas de acordo com os processos que realizam. As usinas siderúrgicas integradas são aquelas que operam nas três fases do processo, ou seja, realizam o beneficiamento do minério através da redução, depois são responsáveis por refinar o aço produzido a partir de ferro-gusa e, por fim, conformam mecanicamente em produtos acabados ou semiacabados. Já as usinas semi-integradas atuam apenas nas fases de refino e conformação mecânica – laminação ou forjamento –, não participando da redução, e então obtendo ferro-gusa de outras usinas ou utilizando sucata metálica como matéria-prima (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2025).

Cerca de 75% do aço fabricado no mundo é proveniente da rota BF-BOF (*Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace*, em português Alto Forno – Conversor LD) e então produzido em usinas integradas. O processo começa com o beneficiamento, que é a sinterização do minério de ferro usado para a produção do ferro líquido no alto forno. O fluxo de materiais se inicia com minério de ferro, carvão, coque, calcário e energia elétrica gerando o sinter, que depois é adicionado a mais coque e fluxantes no alto forno para reduzir a ferro, formando o ferro-gusa líquido. Este é inserido no BOF para ser refinado e transformado em aço. As maiores saídas do processo como um todo são resíduos na forma de poeira e gases, contendo CO₂, SO₂, NO₂, CO, NO_x, e metais pesados. Após esta etapa, é feito o lingotamento – contínuo ou convencional – e o aço sólido segue para etapas de conformação e/ou tratamentos térmicos (LI, 2017).

A segunda maior rota de produção de aço é a EAF, empregada tanto em usinas semi-integradas, quanto em integradas. Essa rota já se inicia com a produção (ou o refino) do aço, que é feito em fornos elétricos, consistindo em fusão e depois

descarburação ou desgaseificação antes do lingotamento. O fluxo de materiais pode seguir de duas maneiras, sendo a primeira com a adição de sucata metálica como fonte de ferro, cal, refratários e ferroligas para fusão no forno elétrico gerando o aço. Também é possível – em usinas integradas – adicionar ferro-gusa líquido em um EAF, e seguir com o processo de refino. Como saídas da rota EAF tem-se resíduos como poeira, gases (CO , CO_2 , SO_2 , NO_x), metais pesados e escória de EAF (LI, 2017). Na Figura 3.1 estão as rotas mais comuns da produção de aço, e nela é possível observar a relação entre os diferentes processos, as principais entradas e saídas.

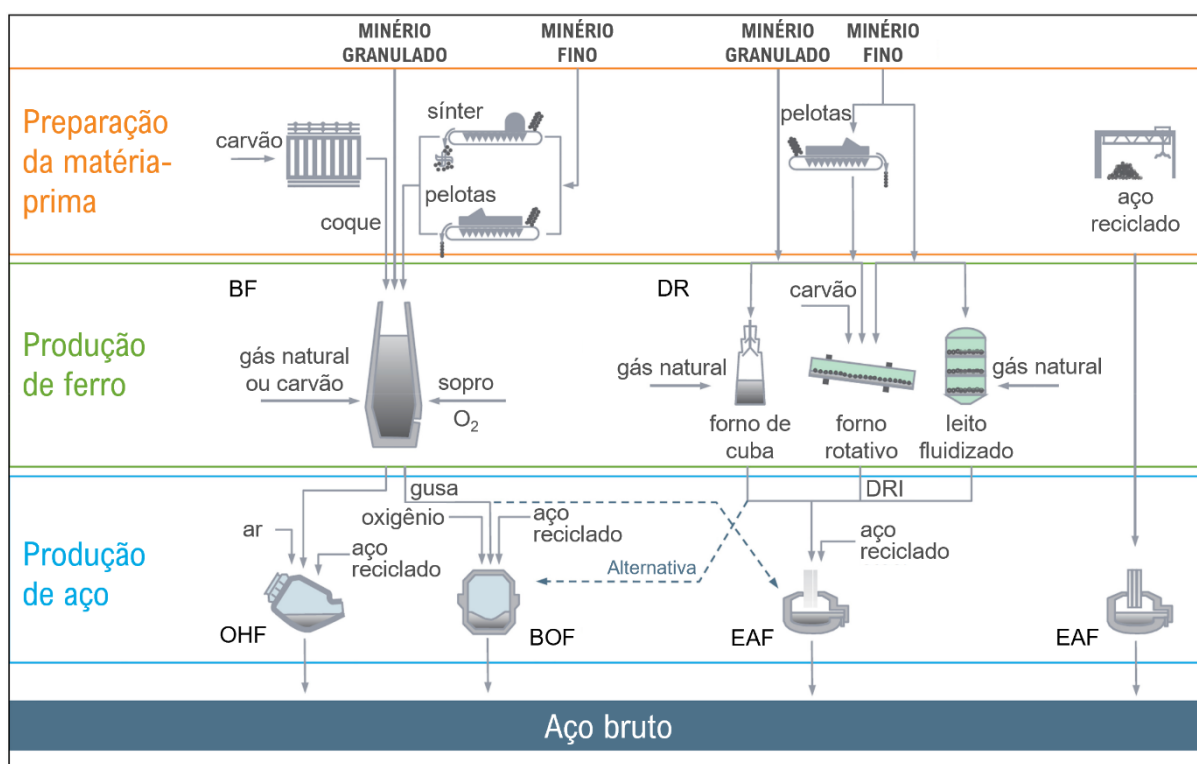


Figura 3.1 – Rotas de produção de ferro e aço. Adaptado de KIM, 2022.

Notas: BF (*Blast Furnace*) – Alto Forno; DR (*Direct Reduction*) – Redução Direta; DRI (*Direct Reduced Iron*) – Ferro Esponja; OHF (*Open Hearth Furnace*) – Forno Siemens-Martin.

O forno elétrico a arco foi inventado por Paul Héroult em 1889, mas foi uma tecnologia que emergiu apenas no século XX, quando houve um aumento na disponibilidade de energia elétrica a menores custos. Por conta da existência de outras tecnologias para produção de aço na época, o EAF era usado apenas para aços especiais, que demandavam longos tempos de refino e elevadas temperaturas, e em sua primeira geração, os fornos tinham capacidade de 1 a 15 toneladas. Para diminuição do tempo de processo, o EAF se reinventou tornando-se uma unidade

dedicada apenas à fusão, e a etapa de refino passou a ser realizada no forno panela. Fornos elétricos de maior potência foram desenvolvidos, e realizadas melhorias para aumento de eficiência energética, tornando possíveis avanços em outros nichos de produção, chegando a fornos com capacidade de 350 toneladas (MADIAS, 2014).

A produção de aço via EAF é o recurso mais importante para a reciclagem de sucata de aço, pois o processo BF-BOF não é capaz de operar com cargas 100% sucata. Os EAF são equipamentos versáteis, podendo carregar desde sucatas a ferro verde (*Hot Briquetted Iron*), ferro esponja (DRI), ferro-gusa sólido e líquido, além de produzir todo tipo de aço, de longos a planos, aços carbono ou ligados, para lingotamento contínuo, convencional ou moldes. Atualmente, é possível inferir sobre um aumento na produção de aço via rota EAF, impulsionado por crescentes pressões regulatórias relativas às emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Mesmo assim não é um processo livre de obstáculos, despertando preocupações relacionadas à geração de poeira, escória, refratários e barulho (MADIAS, 2014).

3.1.2. Sucatas Ferrosas

O termo sucata muitas vezes é utilizado para descrever um objeto que chegou ao final de sua vida útil, podendo sugerir um tipo de resíduo. No entanto, para a indústria siderúrgica, a sucata é uma matéria-prima valiosa e, ao ser fundida, permite a produção de novos aços com ajustes de composição química, fazendo com que o aço seja o material mais reciclado no mundo. Anualmente, cerca de 650 Mt de sucata são consumidas para a produção de aço no mundo, evitando a emissão de cerca de 975 Mt de CO₂ para a atmosfera, já que o seu consumo reduz a utilização de minério de ferro e carvão. Essa matéria-prima pode ser utilizada tanto na rota convencional BF-BOF (limite de 30%) quanto na rota EAF (podendo ser 100% da carga), mas sua geração não acompanha a crescente demanda por aço (WORLD STEEL, 2025).

De forma genérica, a comercialização de sucatas metálicas pode ser dividida quanto ao tipo de material: sucatas ferrosas e sucatas não-ferrosas. Empresas nesse mercado são encarregadas de coletar, classificar, processar e fornecer o material para indústrias de transformação como siderúrgicas e fundições. De acordo com a origem das sucatas ferrosas, tem-se a seguinte divisão: i) sucata de geração interna, material sucateado na própria usina produtora; ii) sucata de geração industrial, resultante de qualquer planta industrial que processe o material; iii) sucata de obsolescência, vinda de bens de consumo (como automóveis, eletrodomésticos) em desuso; iv) sucata de

bens de capital, que seriam materiais provenientes de demolições ou equipamentos industriais (INESFA, 2025). De forma resumida, pode-se classificar as sucatas em dois grandes grupos, que seriam: sucatas pré-consumo (nova), originadas em qualquer processo industrial e consideradas mais limpas e controladas; e as sucatas pós-consumo (antiga), que são produtos ou componentes obsoletos ou em fim de vida útil, tidas como sujas, devido maior ocorrência de contaminações e de misturas, tipo que está disponível em maior quantidade (BELL, 2006).

Como consequência, nota-se que um ciclo contínuo é complexo, envolvendo diferentes agentes geradores e partes interessadas na captação que atuam de forma capilarizada. Em 2020, a RAIS (Relação Anual de Informações Sociais) registrou mais de 3.200 estabelecimentos no setor de comércio de resíduos e sucatas metálicas no Brasil, sendo a maior concentração (40%) no estado de São Paulo. Os requisitos para encomenda, fornecimento e classificação de sucata de ferro e aço no Brasil estão estabelecidos na norma ABNT NBR-16229:2013, a qual determina ações para preservação da segurança e classifica os materiais quanto à origem, características físicas e elementos de liga, apresentado na Tabela 3.1 (INESFA, 2025).

Tabela 3.1 – Classificação de sucatas ferrosas de acordo com a norma ABNT NBR – 16229:2013.

Classificação	Tipo	Descrição
Densidade Aparente	Leve	Densidade aparente $\leq 0,6 \text{ t/m}^3$
	Pesada	Densidade aparente $> 0,6 \text{ t/m}^3$
Elementos de Liga	Não Ligada Comum	Não excedam 0,10%Ni, 0,10%Cr, 0,10%Mo, 1,00%Mn, 0,04%P, 0,05%S, soma demais até 0,50%
	Não Ligada Especial	Não excedam 0,20%Ni, 0,20%Cr, 0,10%Mo, 1,65%Mn, 0,04%P, 0,05%S e demais até 0,50%
	Baixa Liga	Soma dos elementos de liga não ultrapasse 5%; separada por qualidade de aço
	Alta Liga	Soma dos elementos de liga ultrapassa 5%
Outros	Cavaco/Viruta	Sobras da usinagem de peças de aço
	Estamparia	Aço-carbono sem revestimento; solta; retalhos do processo de estampagem
	Triturada/Shredded	Mista passada em trituradores; solta; densidade aparente mín. $0,8 \text{ t/m}^3$

Pode-se afirmar que diversos tipos de sucatas são gerados e comercializados, os quais variam significativamente em termos de geometria e composição química, afetando também o preço dessa matéria-prima. Isso se deve à existência de diferentes

rotas de tratamento e coleta da sucata, e ainda do fato de que o aço é um material usado em inúmeras aplicações. Dessa forma, a escolha de uma proporção ideal de sucatas é tópico de importância para indústrias siderúrgicas, pois por mais que os metais em teoria podem ser reciclados infinitamente, perdas por rendimento e contaminações são fatores que impedem o fechamento do ciclo. Elementos de liga introduzidos involuntariamente correspondem a 8% da sucata metálica adicionada nos EAFs, e elementos como cobre, níquel e estanho (não voláteis e mais nobres que o ferro), permanecem no banho metálico durante o processo (HAUPT, 2016).

As características das sucatas – utilizadas principalmente na rota elétrica (EAF) – têm impacto direto tanto na qualidade do produto de aço quanto na eficiência do processo, como consumo energético. Para a indústria siderúrgica, a entrada de sucata de qualidade nos fornos consome menos eletricidade, proporcionando etapas mais curtas de refino. Como as composições das sucatas variam, o impacto no produto deve ser considerado, pois o uso de material não controlado pode causar acúmulo de elementos residuais contaminantes, o que leva a perdas por diluição e dificuldade de reutilização. É importante que o foco do consumo de sucatas não seja apenas em maximizar as taxas de reciclagem, mas também em otimizar o seu uso considerando aumento da qualidade e ampliação de disponibilidade (HAUPT, 2016).

Considerando as sucatas pós-consumo, que são as mais contaminadas, a presença de elementos residuais ocorre por diferentes motivos. Elementos presentes no estado puro podem ser resultantes de processos ineficientes de separação de peças ou de recobrimentos em produtos, ou resulta de elementos de liga presentes em diferentes classes de aço na sucata. O chumbo pode ser proveniente de latões, pigmento em tintas, presente em soldas, ou até mesmo elemento de liga para melhora de usinabilidade. O estanho, além de estar presente em bronzes, é o recobrimento mais comum em latas alimentícias feitas de aço. O zinco, tem como origem nas sucatas o fato de ser usado em recobrimentos pela galvanização (BELL, 2006).

O cobre é tratado como um dos principais elementos contaminantes em sucatas ferrosas atualmente, e além de termodinamicamente não poder ser removido do banho líquido – apenas diluído – prejudicando a composição do aço produzido, sua presença indesejada nas sucatas de aço impede o ciclo de reciclagem do cobre puro. A maior fonte de contaminação por cobre nas sucatas pós-consumo são componentes de equipamentos eletrônicos não separados, mas também pode ser proveniente de bronzes e outras ligas. E nas sucatas pré-consumo a contaminação ocorre em caráter

progressivo, acumulando ao longo dos ciclos de reciclagem. Alguns elementos menos usuais são: antimônio, que pode ser encontrado em latões e ligas de chumbo; arsênio, que pode estar presente em ligas de cobre, ou usado como descolorante em vidros; e bismuto, usado como elemento de liga para melhora de usinabilidade ou em ligas de chumbo. Já elementos como cromo, níquel, molibdênio e vanádio são usados com frequência em diferentes classes de aço como elementos de liga, então podem estar presente em sucatas pela mistura de tipos de aço (BELL, 2006).

3.1.3. Economia e Sustentabilidade

O aço é material fundamental para a operação de diversos setores industriais, e além de ser um dos mais importantes componentes de infraestrutura, o aço é um facilitador de inúmeras atividades de manufatura. Como já comentado, a indústria do aço é responsável por mais de 3% do PIB global, e gera impactos diretos e indiretos no âmbito socioeconômico, considerando sua cadeia de suprimentos, suas usinas e os setores de consumo. Um estudo da complexidade desses impactos indicou que a produtividade da indústria siderúrgica por trabalhador é três vezes maior do que a média dos setores da economia, ultrapassando 80 mil dólares por ano. Desde 2020, a produção mundial tem sido considerada estável, ficando entre 1.885 Mt e 1.963 Mt, como pode ser visto na Figura 3.2 (WORLD STEEL, 2025).

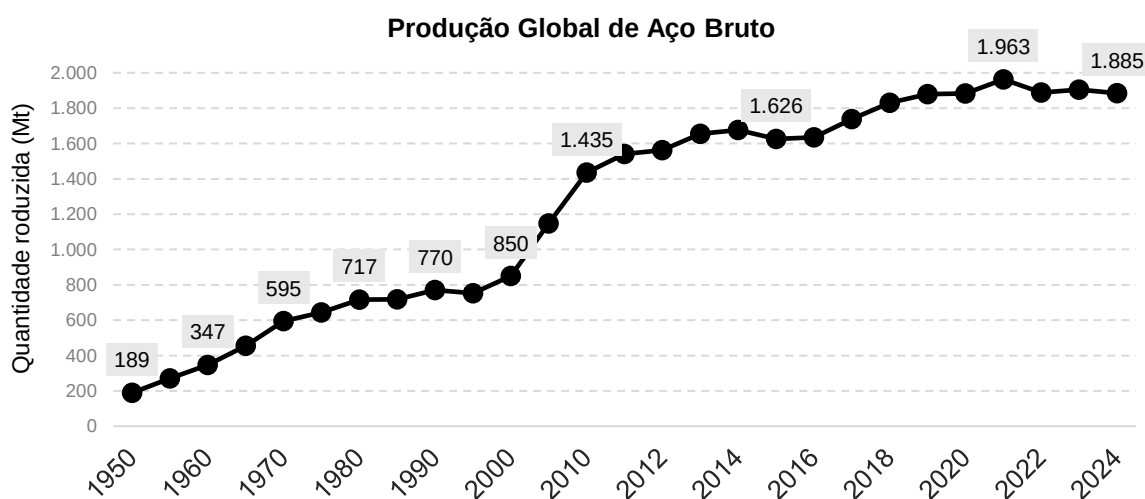


Figura 3.2 – Produção global de aço bruto em megatoneladas. Dados: WORLD STEEL, 2025.

Atualmente, as 50 maiores empresas produtoras de aço são responsáveis por aproximadamente 58% do total de aço bruto produzido anualmente no mundo, chegando a mais de 1.100 milhões de toneladas. Além disso, os 7 maiores países

produtores somam cerca de 80% da produção global (KIM, 2022), sendo a China o maior deles, com uma produção de 1.019 Mt no ano de 2023 (WORLD STEEL, 2025). O Brasil atualmente ocupa a 9º posição em termos de produção de aço, com uma representação de cerca de 1,7% do total global. De 2000 para 2020, a China passou de responsável por 15% da produção mundial para 56%, o que de fato alterou completamente a participação dos demais países, pois o Brasil, por exemplo, tinha uma produção em toneladas menor em 2000, mas representava 3,3% do total mundial (SILVA, 2021). Na Figura 3.3, estão apresentados graficamente os maiores países produtores e as maiores empresas produtoras de aço.

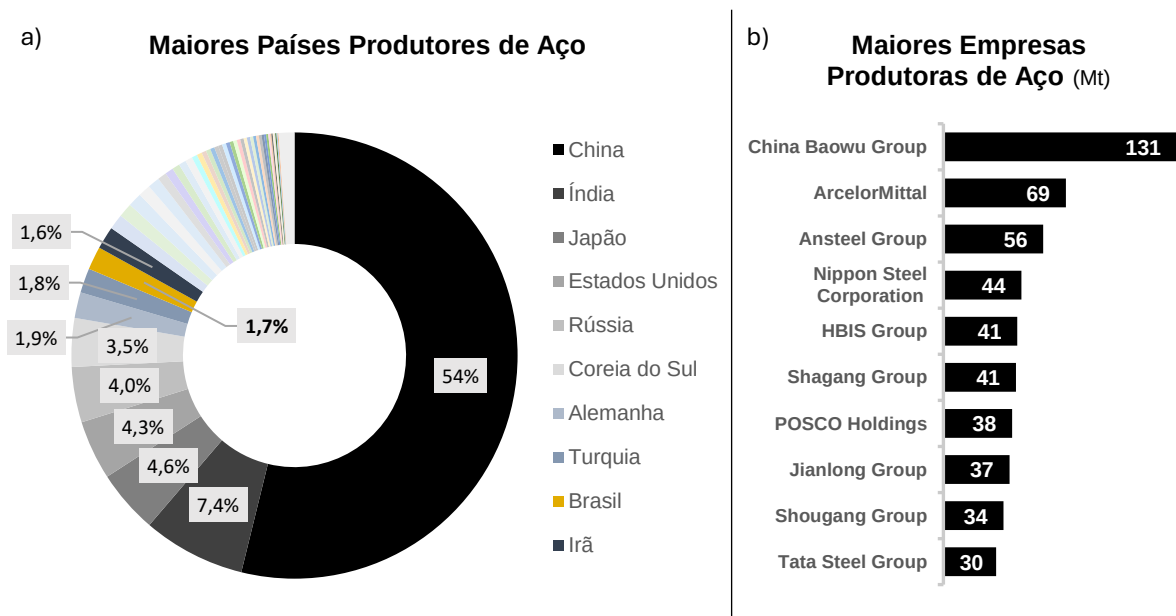


Figura 3.3 – Maiores produtores de aço a) países, e b) empresas. Dados: WORLD STEEL, 2025.

O crescimento e a industrialização das economias emergentes atualmente são fatores que influenciam diretamente a demanda mundial de aço, e uma projeção realizada pela IEA (*International Energy Agency*) retratou que até 2050 a demanda global de aço irá aumentar mais de um terço. Com isso, as emissões foram projetadas em 2,7 Gt de CO_{2eq} por ano, número 7% maior que a emissão atual dessa indústria. Hoje, estima-se que a indústria do aço é responsável por entre 7% e 9% das emissões globais de GEEs, sendo a maior entre as indústrias pesadas pois é altamente intensiva em materiais e energia. Esse setor também pode ser considerado um dos mais difíceis de se descarbonizar, devido à necessidade de elevadas temperaturas de processo, ao uso direto do carbono como insumo em diferentes etapas, e à longa vida útil de seus ativos e margens de lucro relativamente baixas (KIM, 2022).

Ser responsável pela emissão de GEEs é inevitável para a indústria de ferro e aço, mas existem opções para mitigação, como: ampliação de fontes e insumos renováveis, otimização de processos e aumento de eficiência energética, captura e armazenamento de carbono, e até uso de hidrogênio como agente redutor. No entanto, propõe-se que o potencial máximo de descarbonização desse setor é em torno de 15% entre 2010 e 2050, considerando diminuição da pegada de carbono dos setores energéticos e aumento na disponibilidade de sucata ferrosa. Isso porque o processo de produção de aço por rota elétrica (EAF) com uso de sucata é mais verde do que pelas demais rotas. Desde 1900, mais de 22 bilhões de toneladas de aço foram recicladas pela indústria, favorecendo a diminuição do consumo em 28 bilhões de toneladas de minério de ferro e 14 bilhões de toneladas de carvão (KIM, 2022).

Com o uso de sucata como matéria-prima, a intensidade das emissões da indústria do aço pode diminuir entre 62% e 90%, fator altamente dependente da rota de produção e da matriz energética dos países, e totalmente da disponibilidade de sucata. Com isso, a utilização de aço reciclado no processo produtivo não consegue atingir a crescente demanda atual. Outras barreiras para a descarbonização são: financiamento limitado, longos ciclos de investimento, risco de ruptura da produção, e risco de não atendimento da qualidade requerida (KIM, 2022). A afirmação de que o aço é infinitamente reutilizável é comum, mas na prática a sua reciclagem enfrenta diversas limitações. Como o sistema de reciclagem não é completamente eficiente, parte da sucata de aço é contaminada com elementos indesejados, o que pode afetar diretamente as propriedades do material final, e ainda durante os processos ocorrem perdas – químicas – por rendimento (HAGEDORN, 2022).

Informações qualitativas sobre os aspectos e as propriedades do material são indispensáveis para a reutilização do aço como matéria-prima, estabelecendo um gargalo para a reciclagem devido ao fato de existirem milhares de ligas diferentes. Ainda assim, a economia circular na indústria do aço oferece estratégias para aumento da sustentabilidade, levando ao aumento da eficiência de materiais e, consequentemente, à redução de impactos ambientais (HAGEDORN, 2022). Por definição, economia circular consiste em uma estrutura de soluções sistêmicas para enfrentar desafios globais de mudanças climáticas, perda de biodiversidade, poluição e resíduos. O diagrama da economia circular engloba dois ciclos: o técnico (circulação de produtos e materiais por reuso, reparo, remanufatura e reciclagem), e o biológico

(nutrientes de materiais biodegradáveis devolvidos à terra), ilustrando assim, um fluxo contínuo de materiais (ELLEN, 2025).

Para mensurar de forma quantitativa o uso geral de recursos e as emissões, é comum o uso de indicadores analíticos. No cenário ambiental, tem-se as seguintes categorias de impacto como principais: eficiência de material, eficiência energética, emissão de poeira, e emissões de GEEs (que pode ser especificada em termos do gás). Comparando-se as duas maiores rotas de produção de aço, é possível notar que o consumo de energia por tonelada de aço produzido pela rota BF-BOF é 2,8 vezes maior do que pela rota EAF, sendo que cerca de 78% desse consumo ocorre para a produção do ferro no alto forno. Na rota BF-BOF, a emissão de poeira é 7,7 vezes maior do que na rota EAF, diferença proveniente da queima de combustível, sendo a etapa de sinterização responsável por quase 48% das emissões da pior rota. Já quanto à emissão de CO₂ por produto produzido, tem-se que a rota EAF emite 2,6 vezes menos do que a rota BF-BOF, e as emissões dos demais GEEs também são consideravelmente menores quando a produção de aço ocorre via EAF (LI, 2017).

3.2. AÇOS FERRAMENTA

Como já apresentado, os aços são ligas do sistema ferro-carbono que podem conter adições específicas de outros elementos de liga, e dessa forma milhares de composições podem ser produzidas. Diferentes métodos de classificação para esses materiais foram criados, podendo ser de acordo com a composição química – teor de carbono e teor de elementos de liga – ou de acordo com a aplicação mais comum. Além da classificação, cada aço também tem uma nomenclatura e uma especificação, sendo a *Society of Automotive Engineers* (SAE), a *American Iron and Steel Institute* (AISI), e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) três organizações atualmente responsáveis pela especificação dos aços (CALLISTER, 2016).

Aços baixo carbono são aqueles que geralmente contêm menos de 0,25% em peso de carbono, no geral não respondendo a tratamentos térmicos para a formação de martensita, com sua microestrutura consistindo em ferrita e perlita. Sua produção é considerada a mais barata entre os aços, e são a classe produzida em maior quantidade, com aplicações em carcaças de automóveis, vigas, canaletas, latas etc. Os aços médio carbono apresentam concentrações de carbono entre 0,25%p e 0,60%p, podendo ser tratados termicamente para melhora de suas propriedades mecânicas, e as aplicações comuns incluem rodas de trens e trilhos, engrenagens e

outros componentes estruturais que exigem combinação de resistência mecânica com tenacidade. Por fim, os aços alto carbono são aqueles cujo teor de carbono está entre 0,60%p e 1,4%p, sendo os mais duros mas menos dúcteis, especialmente resistentes ao desgaste na condição temperada e revenida. Todas essas três classes citadas acima podem conter aços com diferentes teores de elementos de liga, o que confere a cada um deles diferentes características e propriedades (CALLISTER, 2016).

Ainda quanto à composição química, os aços também podem ser classificados em: aços ligados, que são todos aqueles que recebem adição de algum elemento de liga; aços microligados, quando a soma dos elementos de liga não ultrapassa 1%p; aços baixa liga, nos quais o total de elementos de liga não ultrapassa 3,5%p; e aços alta liga, que apresentam um teor de elementos de liga de no mínimo 10%p. Há também os aços inoxidáveis, altamente resistentes à corrosão em diversos ambientes, com pelo menos 11%p de cromo e outros elementos como níquel. Quanto à aplicação, as classes mais comuns são: aços estruturais, ao carbono ou ligados, que exibem elevada relação entre limite de resistência à tração e limite de escoamento; aços mola, que apresentam um elevado limite de escoamento; e aços ferramenta, caracterizados por elevada resistência à abrasão, com adição de elementos como cromo, manganês, vanádio, molibdênio e tungstênio, também com carbono alto (CHIAVERINI, 2005).

Os aços ferramenta são tidos como um tipo especial de liga, por conta dos elementos de liga utilizados e por conta das dificuldades enfrentadas no processo de fabricação, exigindo a mais elevada qualidade em todas as etapas. Esses materiais podem ser aços carbono, aços ligas ou aços rápidos, capazes de serem temperados e revenidos, com as principais propriedades sendo elevada dureza, resistência ao desgaste e certa tenacidade. São utilizados como ferramentas manuais, dispositivos mecânicos para corte, conformação ou estampagem de metais não ferrosos ou polímeros, mas também podem ser fabricados para aplicações específicas como molas, ímãs ou rolamentos (ROBERTS, 1998).

Essa classe de aços é geralmente produzida pela rota elétrica, sendo que a fusão ocorre em um FEA, e depois o processo segue para etapas de refino secundário que podem ocorrer em um conversor AOD (*Argon Oxygen Decarburization* – Descarbonetação por Oxigênio e Argônio) ou um conversor VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization* – Descarbonetação por Oxigênio sob Vácuo), junto com forno panela. A sucata normalmente compõe cerca de 75% da carga para a produção de aços ferramenta, e cuidados especiais devem ser tomado com essa matéria-prima para que

não haja contaminação por elementos indesejáveis a essa classe de aços, como níquel e cobre, que não podem ser oxidados no banho metálico. Após a etapa de lingotamento, os aços ferramenta podem passar por recozimento para evitar rachaduras ou seguirem quente para a etapa de forjamento (ROBERTS, 1998).

Existem muitos tipos de aços ferramenta classificados pelo sistema AISI. A divisão é feita em grupos baseados em características dominantes dos aços ferramenta, podendo ser: quanto à liga, quanto à aplicação, ou quanto ao tratamento térmico. Na Tabela 3.2, estão apresentados os tipos de aços ferramenta e suas principais características (ROBERTS, 1998).

Tabela 3.2 – Classes de aços ferramenta e suas características (ROBERTS, 1998).

Aço Ferramenta	Símbolo	Especificidade	Características
Para Trabalho a Quente	H	Ao Cromo	Resistência a cargas de impacto em altas temperaturas, resistência ao amolecimento e à fadiga térmica, teor médio de carbono, alto cromo e outros formadores de carbonetos.
		Ao Tungstênio	Maior resistência ao amolecimento em exposição a altas temperaturas, alta fração de carbonetos estabilizados, menor tenacidade.
		Ao Molibdênio	Boa resistência ao amolecimento, microestrutura estável em operações a altas temperaturas, alternativa ao H ao tungstênio.
Para Trabalho a Frio	D	Alto Carbono e Alto Cromo	Altíssima resistência à abrasão e ao desgaste, temperabilidade ao ar, controle dimensional.
Temperável em Óleo	O	Carbono Elevado	Resistência ao desgaste em trabalho a frio, martensita revenida a baixas temperaturas, dispersões finas de carboneto.
Temperável ao Ar	A	Média Liga	Resistência ao desgaste em trabalho a frio, combinação de dureza e tenacidade, elevada temperabilidade, estabilidade dimensional.
Temperável em Água	W	–	Menor teor de liga dentre os ferramenta, são essencialmente aços carbono, apenas a superfície da ferramenta é endurecível.
Resistente ao Choque	S	Carbono Moderado	Alta tenacidade e resistência à fratura combinadas com resistência mecânica e resistência ao desgaste.
Para Moldes	P	Carbono Baixo	Passíveis de conformação de cavidades para aplicação como moldes, posteriormente cementados para resistência ao desgaste e dureza superficial.
Rápidos ao Tungstênio	T	–	Ferramentas de corte de alta velocidade, ligado a elementos formadores de carbonetos, alta temperabilidade e microestrutura estável a altas temperaturas, resistência ao desgaste.
Rápidos ao Molibdênio	M	–	Semelhantes à classe T, tenacidade superior, carbonetos estáveis à temperatura, mas descarbonetam com maior facilidade.

Os aços ferramenta designados como grupo H no sistema AISI são aqueles utilizados para aplicações de trabalho a quente, e resistem ao amolecimento com exposições repetitivas ou prolongadas a altas temperaturas de trabalho. No geral, essa classe apresenta propriedades como resistência à deformação em temperatura de trabalho; resistência ao choque mecânico ou térmico, e tenacidade; resistência ao desgaste; elevada dureza; resistência à distorção térmica e às alterações dimensionais; e resistência à fadiga térmica. Esse grupo de ligas é subdividido em 3 classes: ao cromo; ao tungstênio; ao molibdênio (ROBERTS, 1998).

Aços ferramenta para trabalho a quente ao cromo são os materiais mais utilizados em atividades de forjamento e fundição sob pressão, como o H13. Estes, foram originalmente desenvolvidos para fundição de ligas de alumínio, e como objetivos, além de um custo razoável, necessitavam de temperabilidade ao ar, mínima formação de incrustações, resistência à erosão e à fadiga térmica. Para os aços ferramenta da classe H ao cromo, o teor médio de carbono promove certa tenacidade, e com o revenimento a temperaturas elevadas carbonetos finos e estáveis precipitam, colaborando para a resistência a altas temperaturas. Esses materiais são duplamente revenidos, e atingem dureza de trabalho entre 44 e 50 HRC. Os principais aspectos de atenção são inclusões e carbonetos grosseiros, que são pontos de iniciação de trinca, reduzindo tanto a resistência à fratura quanto à corrosão (ROBERTS, 1998).

3.2.1. Influência de Elementos

A adição de elementos químicos causa drásticas mudanças no comportamento dos aços em geral. Desde mudanças no diagrama de fases ferro-cementita, como o deslocamento do ponto eutetóide, alteração das frações relativas das fases formadas, a mudanças como aumento de resistência à corrosão, aumento da susceptibilidade a tratamentos térmicos, dentre outros (CALLISTER, 2016). De uma forma geral, os elementos adicionados nos aços podem influenciar sua qualidade de duas maneiras: i) diretamente, quando propriedades dos aços são afetadas, por meio da formação de compostos intermetálicos, segregação, solução sólida; ou ii) indiretamente, caso a existência desse elemento provoque alterações de processo como maior tempo de panela, modificações de lingotamento ou de tratamentos térmicos (BELL, 2006).

Os elementos químicos presentes nos aços podem ser classificados em três tipos: elementos de liga primários, elementos de liga secundários, e elementos contaminantes. Os elementos de liga são adicionados com objetivo de melhorar

propriedades dos aços, e em sua maioria os primários são carbono, manganês e silício. Enquanto elementos como níquel, cromo, molibdênio, alumínio, vanádio, nióbio, cobalto, tungstênio e cobre costumam ser considerados elementos de liga secundários. Os contaminantes são aqueles elementos que não têm função definida no aço e se presentes em grandes quantidades são deletérios às propriedades do material, e alguns exemplos são: enxofre, fósforo, chumbo, estanho, antimônio e zinco (BELL, 2006). A Tabela 3.3 apresenta brevemente as maiores influências.

Tabela 3.3 – Influências gerais dos principais elementos químicos presentes em aços (BELL, 2006).

Elemento	Influências
Carbono	• Endurecimento através do carboneto Fe_3C • Diminuição da soldabilidade com seu aumento • Colabora para a formação da escória espumante
Manganês	• Estabilizador de Fe_3C – prevenção contra grafitação • Prevenção contra defeitos como <i>tearing</i> e <i>hot-shortness</i> • Elevar temperabilidade, tenacidade e resistência à tração, diminuir soldabilidade
Silício	• Desoxidação do banho metálico, mas aumenta chance de grafitação • Redução de usinabilidade, mas aumento de resistência à tração – inclusões • Formação exotérmica da sílica diminui tempo de processo, reduz vida do refratário
Cobre	• Defeitos superficiais (como <i>hot-shortness</i>) em processos a quente devido ao menor ponto de fusão de zonas enriquecidas com cobre
Níquel	• Aumento de temperabilidade, resistência mecânica, tenacidade • Melhora soldabilidade e fadiga, resistência à corrosão • Pode gerar custos de processo com diluição
Cromo	• Aumento extremo da resistência à corrosão • Melhora na resistência ao desgaste – formação de carbonetos • Pode causar fragilização no revenimento (na presença de P, Sn, As, Sb)
Molibdênio	• Endurecimento da ferrita por solução sólida – à custo da ductilidade • Afeta a temperabilidade, e é forte formador de carbonetos • Não oxida facilmente, pode gerar custos de processo
Vanádio	• Refinador de grãos – restringe o crescimento de grão austenítico • Aumento de resistência ao desgaste – formação de carbonetos e nitretos • Influência positiva sobre resistência ao escoamento, tenacidade e dureza a quente
Nióbio	• Semelhante às influências do vanádio, mas não forma nitretos • Ambos são elementos caros e presentes em aços especiais
Alumínio	• Desoxidante no processo de fusão – afinidade com oxigênio • Possível formação de nitretos, melhora na resistência ao desgaste e redução de envelhecimento por deformação • Precipitação de óxidos no lingotamento pode entupir bicos do distribuidor
Cobalto	• Endurecimento da ferrita por solução sólida, aumento de dureza a quente • Não pode ser removido do aço líquido, apenas diluído
Tungstênio	• Formador de carbonetos duros e estáveis • Aumento da resistência ao desgaste e dureza a quente • Desvantagem e limitação: custo elevado
Antimônio	• Diminui a resistência mecânica • Aumenta probabilidade de ocorrência de <i>hot-shortness</i>

Enxofre	• Melhora da usinabilidade • Reduz resistência ao impacto, ductilidade, soldabilidade • Prejudicial ao acabamento superficial, e fragilidade a quente (se Mn baixo) • Para sua remoção, elevada temperatura e ebulição de carbono (<i>boil</i>)
Fósforo	• Perda de ductilidade e resistência ao impacto • Oxidado para escória, mas se elevadas temperaturas é reincorporado no banho • Indiretamente causa aumento no tempo de processo, consumo de energia e de materiais, diminuição do rendimento
Estanho	• Baixa solubilidade, gerando segregação que pode levar a defeitos como <i>hot-shortness</i> e fragilização • Não pode ser oxidado, apenas diluído
Chumbo	• Aumento da usinabilidade pela formação de inclusões – quebra cavaco • Baixa solubilidade que leva a segregação e defeitos superficiais • Elevada toxicidade e permeabilidade nos tijolos refratários
Zinco	• Efeitos similares ao chumbo • Insolúvel no aço e tende a volatilizar • Pode levar ao <i>hot-shortness</i>, segrega no metal e causa defeitos superficiais

Quanto aos aços ferramenta, os elementos de liga comumente adicionados podem deslocar os limites do campo de fases no diagrama Fe-C, sendo cada elemento capaz de estabilizar uma fase, a depender de seu tamanho atômico e sua estrutura eletrônica. Elementos como cromo, molibdênio, nióbio, silício, tungstênio e vanádio são estabilizadores da ferrita, e elevam a temperatura eutetóide. Elementos estabilizadores da austenita, que são carbono, cobalto, cobre, manganês e níquel, diminuem a temperatura eutetóide. A formação de martensita é um dos objetivos no processamento de aços ferramenta (e aços temperáveis no geral), e sabe-se que essa fase de propriedades únicas não ocorre em equilíbrio. Por isso, é de suma importância a presença de elementos de liga nesses aços capazes de alterar a temperatura de formação da martensita, influenciando nos tratamentos térmicos (ROBERTS, 1998).

Outra característica indispensável no projeto de aços ferramenta – e marcante para essa classe de aços – é a capacidade de formar grandes volumes de carbonetos. As propriedades destes materiais como elevada dureza, resistência ao desgaste e resistência à deformação a quente são garantidas pela presença de consideráveis frações volumétricas de carbonetos. No entanto, estes constituintes podem dificultar processos de tratamentos térmicos e a usinabilidade dos aços ferramenta. A formação dos carbonetos pode ocorrer durante a solidificação do material, nos tratamentos de austenitização e de revenimento, ou durante o trabalho a quente. Os elementos mais fortes para a formação de carbonetos são os metais de transição (como titânio, cromo, vanádio, molibdênio, tungstênio e outros), pois além de possuírem elevado ponto de

fusão, as ligações interatômicas metal-carbono são fortes, formando carbonetos como M_3C , M_7C_3 , MC e $M_{23}C_6$ (ROBERTS, 1998).

Os aços ferramenta para trabalho a quente ligados ao cromo – grupo H na classificação AISI – possuem elementos de liga responsáveis por influenciar em suas propriedades específicas e assim garantir as aplicações desse grupo de aços. Nos aços como o H13, o teor de cromo tende a ser de médio a baixo para evitar a possibilidade de trincas e ainda os tornar altamente forjáveis. Cromo e molibdênio são fortes formadores de carbonetos, o que está diretamente relacionado à dureza desses materiais e resistência ao desgaste, e ainda a combinação desses elementos pode retardar transformações difusivas da austenita. O molibdênio também é capaz de promover a formação da martensita em regiões distantes da superfície temperada, o que reflete em baixas taxas de resfriamento. A maior fração da adição de vanádio e tungstênio é incorporada na formação de carbonetos estáveis, e por isso acabam tendo pouca influência na temperabilidade (ROBERTS, 1998).

3.2.2. Desafios Tecnológicos

Os aços ferramenta são materiais de elevado desempenho destinados a aplicações críticas, sendo a liga e o processamento de cada aço projetados para o melhor desempenho sob as condições operacionais específicas. Pode-se dizer que o sucesso da produção das ferramentas, matrizes e dos moldes com essa classe de aços depende de fatores como: aço de alta qualidade, projeto mecânico adequado, seleção e aplicação adequadas, tratamento térmico correto, acabamentos íntegros. No entanto, falhas prematuras podem ocorrer em casos nos quais a microestrutura obtida no final da produção foi a de mais alta qualidade, mas houve uso inadequado do componente. Ou o contrário, sendo que mesmo o material projetado e aplicado de forma adequada sem sobrecargas em serviço falhou de modo inesperado, devido a problemas microestruturais oriundos do processo produtivo (ROBERTS, 1998).

Falhas como fratura frágil podem ocorrer nos componentes, sendo formadas trincas intergranulares nos contornos de grão austeníticos – já fragilizados por austenitização excessiva ou pela presença de hidrogênio, por exemplo. Essa falha é causada por tensões tanto em serviço quanto as geradas em tratamentos térmicos, e pode ser mais pronunciada caso o tamanho de grão da austenita seja grosseiro, caso haja segregação de fósforo nos contornos de grão ou, até mesmo, cementita precipitada nos contornos. As falhas inesperadas podem ser influenciadas por outros

tipos de partículas, caso elas sejam grosseiras, presentes em densidades excessivas ou, ainda, distribuídas de forma heterogênea na microestrutura (ROBERTS, 1998).

Adversidades podem acontecer não somente em uso, mas também durante o processamento dos materiais. Vazios podem ser iniciados a partir de carbonetos durante etapas de conformação a quente – por laminação ou forjamento – e coalescem formando trincas. Outra questão é a ductilidade a quente na condição fundida, a qual pode ser prejudicada caso o espaçamento interdendrítico secundário seja grande suficiente para a coalescência dos vazios levar a trincas. Também se encontram perfis pesados ou forjados com a formação de fissuras, conhecidas como “lascagem”, que pode ocorrer devido ao excesso de hidrogênio retido na solidificação, que tem baixa difusividade atômica no aço sólido e se concentra nos contornos de grão, diminuindo a resistência coesiva da microestrutura a ponto de trincas se iniciarem apenas com a tensão residual gerada no resfriamento (ROBERTS, 1998).

Durante o processamento a quente, os aços são submetidos a complexas combinações de tensões mecânicas e térmicas. Um dos resultados disso, pode ser a fragilidade a quente, fenômeno no qual o metal perde ductilidade em temperaturas elevadas ($T > 0,5.T_{\text{fusão}}$). Essa propriedade de ductilidade a quente é afetada pela quantidade – e distribuição – de elementos residuais no material, através de fatores como: segregação em estado sólido e ancoramento por precipitação em contornos de grão; deslizamento do contorno de grão; recristalização estática e recristalização dinâmica retardada; concentração local de deformações na austenita e/ou na interface austenita-ferrita. A fragilidade a quente pode levar a falhas no processamento do aço obstruindo linhas produtivas e causando prejuízos financeiros (KAPOOR, 2024).

Em muitos casos, a produção de aço pela rota elétrica (FEA) com utilização de sucata, além de ser mais sustentável do que a rota primária, é comercialmente mais atraente. No entanto, com o aumento da demanda por ligas de alto desempenho aumenta-se também a demanda por matérias-primas de elevada qualidade e limpeza. Em termos gerais, a quantidade de sucata pós-consumo disponível – considerada mais contaminada – supera a disponibilidade de sucata pré-consumo, causando, então, um conflito. Outra incompatibilidade está no fato de que se busca uma produção de aços com a maior fração de sucata possível, o que pode ser afetado considerando as possibilidades de contaminação e acúmulo de residuais no aço. Os maiores desafios são o entendimento da tolerância para ligas de alto desempenho e o aumento da utilização de sucata de baixa qualidade (RAABE, 2023).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção visa descrever o qual o material analisado no estudo de caso a ser apresentado, em termos de composição química e características relevantes como processamento realizado na empresa de origem. Também estão descritas as análises laboratoriais realizadas no material para obtenção dos resultados, e a origem das amostras para cada caso. Por fim, são apresentados os métodos de investigação e obtenção dos indicadores que envolvem dados de sustentabilidade e econômicos.

4.1. MATERIAL

O material analisado no presente trabalho foi um aço ferramenta H13 produzido na Villares Metals SA, em Sumaré – SP. A composição típica de um aço H13 pode ser vista na Tabela 4.1, e como esse é um material comercializado internacionalmente, pode-se afirmar que a composição química de todo o material analisado no trabalho está de acordo com as faixas da norma ASTM A681.

Tabela 4.1 – Faixas de composição do aço H13 de acordo com ASTM A681.

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Mo
Mínimo (%)	0,32	0,20	-	-	0,80	4,75	0,80	1,10
Máximo (%)	0,45	0,60	0,030	0,030	1,25	5,50	1,20	1,75

Além da composição química apresentada, todas as amostras de aço H13 que serão apresentadas e discutidas no presente trabalho seguiram o fluxo produtivo apresentado na Figura 4.1. A Villares Metals é uma usina siderúrgica semi-integrada, e, portanto, sua principal matéria-prima é a sucata ferrosa, e todos os aços e ligas especiais são fundidos via rota elétrica.

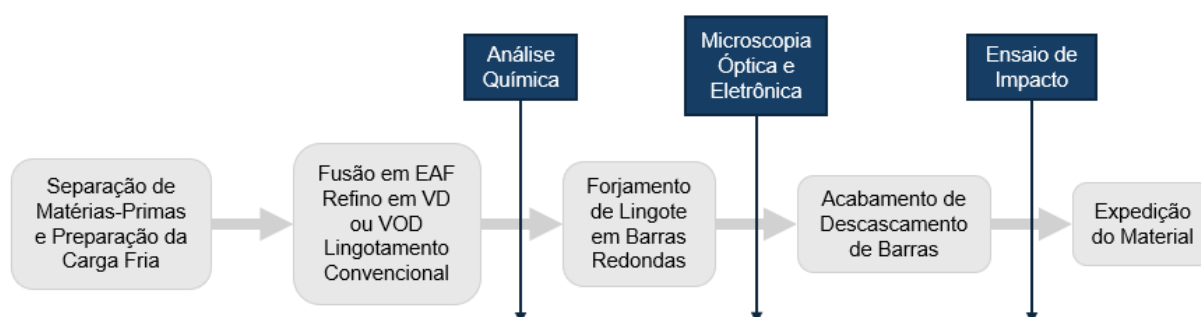


Figura 4.1 – Fluxo do processo do aço ferramenta H13 analisado.

4.2. ANÁLISES LABORATORIAIS

Como mostrado na Figura 4.1, as análises experimentais foram realizadas em três momentos do processo produtivo. A primeira delas foi a análise química do aço, a qual foi realizada antes da etapa de lingotamento – e depois de todas as correções realizadas – para a conferência de todos os elementos químicos de interesse e a liberação do processo. As análises químicas apresentadas no presente trabalho foram realizadas no Laboratório Químico da empresa nos equipamentos: Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X modelo Axios Fast da Malvern Panalytical, e Analisador Elementar por Combustão modelo CS844 da LECO Corporation.

Em um segundo ponto, antes do processo de acabamento das barras de H13, foram realizadas as análises metalográficas. Foram retiradas amostras de diferentes regiões das barras de H13, e essas amostras foram primeiramente cortadas das barras de produto na área produtiva, seccionadas em amostras e, então, embutidas em baquelite no Laboratório Metalográfico da empresa. Em seguida, as amostras cortadas foram inseridas no equipamento MAPS-2 da Struers, para a realização da preparação metalográfica. Esse processo é automatizado, e as amostras passam por discos compatíveis com lixas de granulação 120 e 600 mesh, depois são polidas em suspensão de diamante com granulometria de 6 μm e por fim 1 μm .

Depois de preparadas, algumas amostras passaram por ataque químico em Nital 4%, e então tanto as amostras atacadas como as sem ataque químico – apenas polidas – foram analisadas no microscópio óptico modelo Axiovert 200MAT da marca Zeiss. Amostras sem ataque químico também foram analisadas no Microanalisador de Sonda Eletrônica (EPMA – *Electron Probe Microanalyzer*) JXA-8230 da marca Joel, equipado com detectores de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy*) e de Espectroscopia de Raios-X Dispersiva em Comprimento de Onda (WDS – *Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy*). Nesse equipamento foram registradas tanto imagens da microestrutura quanto realizadas as avaliações semiquantitativas dos elementos químicos.

A análise de energia absorvida no impacto é um procedimento padrão realizado na usina antes da liberação dos materiais para o cliente, portanto um controle de qualidade. No caso das amostras de H13, o ensaio se deu no Laboratório Físico e seguindo a norma ASTM E23. O método de ensaio foi Charpy tipo A, tendo os corpos de prova com entalhe “V” extraídos da extremidade da barra no sentido transversal. As dimensões do corpo de prova eram 10 x 10 x 55 mm, com entalhe central de 2 mm

de profundidade, ângulo de abertura de 45° e raio do entalhe de 0,25 mm. Todas as análises foram realizadas em triplicada e em temperatura ambiente, sendo calculados os valores médios de energia absorvida no impacto em Joules.

4.3. ANÁLISE DE INDICADORES

Análises de dados quantitativos foram realizadas para obtenção de resultados em termos de indicadores de sustentabilidade e de indicadores econômicos. Foram coletados dados de oito usinas siderúrgicas globais, divulgados publicamente em seus relatórios anuais e/ou plataformas digitais. Os dados de interesse para construção da discussão foram: produção anual de aço bruto; emissão anual de GEEs; intensidade de emissão (quantidade de GEEs por quantidade de produto); consumo energético anual; intensidade energética (consumo de energia por quantidade de produto); e matriz energética predominante das instalações. Foram coletados em endereços eletrônicos os preços de matérias-primas (sucatas e ferroligas) de interesse para a fusão de H13 via EAF. Para padronização dos dados, esses foram convertidos – quando necessário – de acordo com as correlações mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores para conversão de medidas, unidades e moedas.

Unidade	Conversão	Data (Referência)
Euro (€)	1 = R\$ 6,40	24/06/2025
Dólar (USD)	1 = R\$ 5,51	(MORNINGSTAR, 2025)
Megawatt-hora (MWh)	1 = 3,6 GJ	–

Como continuação do estudo de caso da produção do aço H13, também foram realizadas análises relacionadas à pegada de carbono das matérias-primas utilizadas, dividindo-se a análise em relação aos elementos de liga presentes nesse aço e respectivas ferroligas, e em relação à base do material, que é o ferro, comumente originado da sucata. Esse estudo partiu das seguintes considerações: a sucata de H13 tem a mesma composição que o próprio aço; a perda por oxidação é um valor fixo empírico; o fator de emissão/a pegada de carbono das ferroligas foi extraído de *GaBi Database*; e, por simplificação, o teor médio de elemento de liga nas ferroligas é 60%, enquanto o manganês foi considerado puro. No caso do estudo para a sucata de aço carbono de elevada pureza, o único elemento de liga considerado foi o próprio ferro e a matéria-prima comparada com ferro-gusa. Com isso, todos os cálculos de emissão de CO_{2eq} seguiram o fluxo da Figura 4.2.

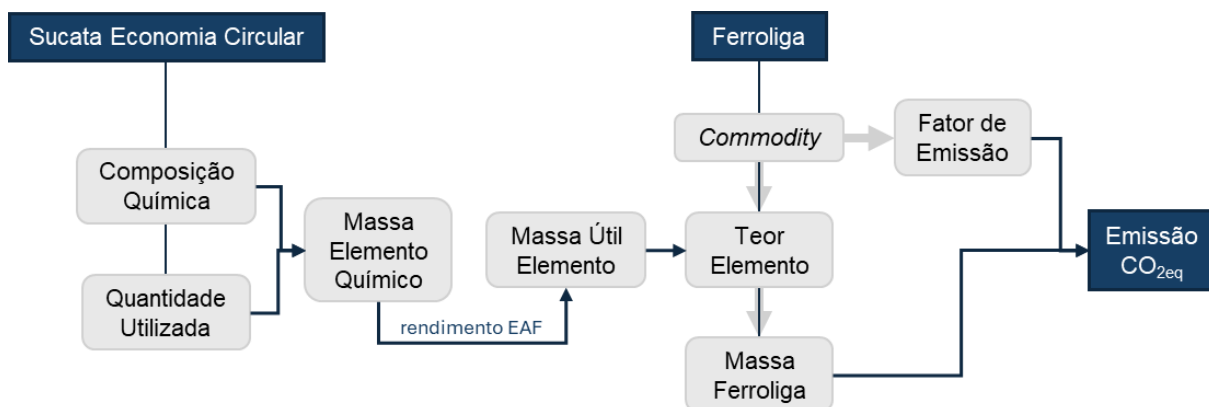


Figura 4.2 – Fluxo do cálculo de emissão de CO_{2eq} das ferroligas.

Por fim, a análise de indicadores econômicos foi realizada com as conversões cambiais da Tabela 4.2. Para essa etapa do estudo, foi determinada uma carga padrão com as matérias-primas usadas para a produção do aço ferramenta H13 e suas respectivas quantidades estimadas por balanço de massa de acordo com a composição do aço. Foram criados outros três cenários relacionados à disponibilidade – ou não – de sucata de qualidade, variando-se a quantidade das possíveis matérias-primas para a produção de um H13. A construção da carga padrão para o H13 deu-se a partir das faixas de composição do produto e os teores já fixados de elementos nas ferroligas. A Figura 4.3 ilustra os quatro cenários estabelecidos e utilizados para os cálculos, sendo os resultados apresentados na próxima seção.

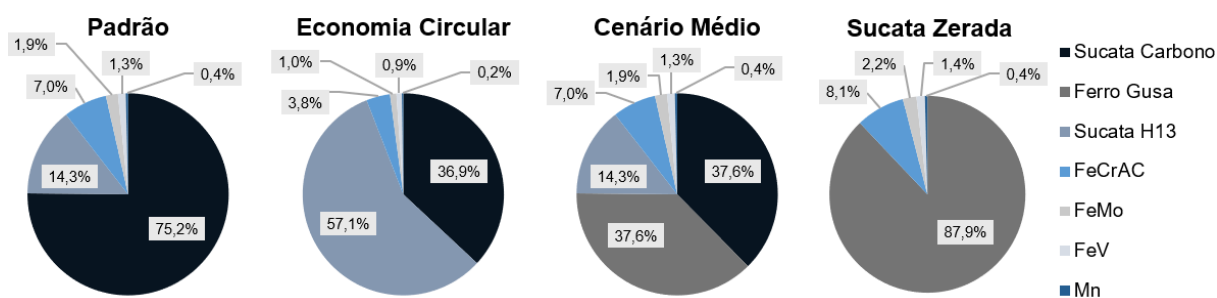


Figura 4.3 – Possibilidades de cargas para produção de H13.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados do presente trabalho juntamente com as respectivas discussões. Essa seção foi dividida em dois pilares principais, sendo que no primeiro momento serão discutidos os resultados relacionados à qualidade do produto de aço H13. A análise do produto será feita como um estudo de caso, e a maior parte da discussão ocorre sobre a relação entre processo, microestrutura e defeitos superficiais, sendo também apresentados resultados do ensaio de impacto. No segundo momento, serão apresentados resultados referentes aos indicadores de sustentabilidade e aos indicadores econômicos, tanto para o cenário siderúrgico geral, quanto focado em exemplos da produção de H13 em uma usina semi-integrada.

5.1. QUALIDADE E PRODUTO

A produção de aços ferramenta como o H13 realizada via rota elétrica inicia-se com a preparação das matérias-primas, chamada confecção de carga. A carga de aços produzidos via EAF é composta em sua maior parte por sucatas, sejam elas pós-ou pré-consumo, e por ferroligas em menores proporções, que são matérias-primas derivadas de minérios utilizadas para introdução de elementos químicos específicos. O uso de sucata como matéria-prima para a produção de aços especiais pode causar impactos em termos de qualidade no produto. Como apresentado na seção de fundamentação teórica, as sucatas pós-consumo podem ser coletadas de diferentes fontes, e sua qualidade é extremamente dependente da separação. A presença de certos elementos contaminantes ou indesejados pode não interferir em determinada propriedade ou característica do produto, devido aos diferentes processos realizados e diferentes solicitações do material. Entretanto, podem influenciar negativamente o desempenho do material tanto nos processos produtivos quanto em trabalho.

O material analisado foi fundido a partir dessa mistura em um EAF de cerca de 35 toneladas, solidificado em lingoteiras de ferro fundido e, em seguida forjado a quente. O aço depois de forjado na forma de barras cilíndricas – de aproximadamente 200 mm de diâmetro e 5.000 mm de comprimento – segue para a etapa de acabamento, na qual é realizada a operação de descascamento para remover carepas de óxido formadas no processo e outras irregularidades da superfície. O presente

estudo de caso irá evidenciar e discutir sobre defeitos superficiais encontrados nas barras de H13 mesmo após o processo de acabamento. Os defeitos encontrados são na forma de trincas que aparecem no sentido longitudinal da barra, como é possível ver na Figura 5.1. Observa-se que são trincas descontínuas e relativamente superficiais, dispersas e sem localização preferencial.

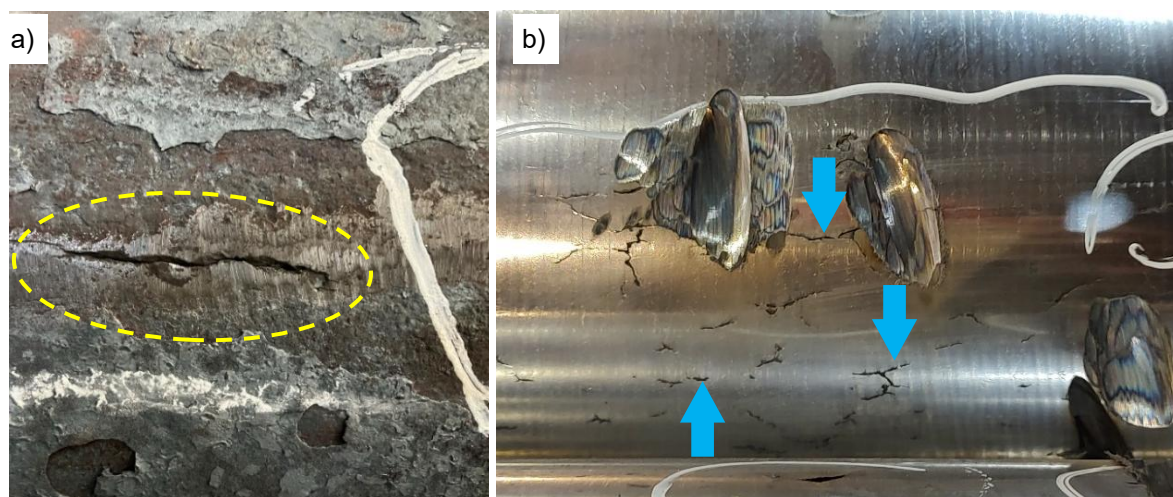


Figura 5.1 – Barra cilíndrica de aço H13 na condição a) forjada, e b) descascada.

Na Figura 5.1.a), está registrada uma trinca – indicada pelo tracejado amarelo – identificada em uma barra de H13 na condição forjada, sendo possível observar também as irregularidades superficiais derivadas do processo e a aparência de carepa oxidada. Já na Figura 5.1.b), tem-se uma barra após a operação de descascamento, já com a camada superficial removida. Nessa barra, a presença de trincas – indicadas pelas setas azuis – evidenciam o fato de que a operação de acabamento não foi suficiente para remover os defeitos. Algumas regiões da barra foram esmerilhadas para a observação da profundidade das trincas, constatadas como superficiais. E um comprimento variável entre 10 mm e 30 mm foi encontrado.

5.1.1. Microestrutura

Para a caracterização, o estudo e compreensão do defeito observado nas barras, foram realizadas análises microestruturais. Com as trincas nas barras de H13 identificadas antes do descascamento, foram cortadas amostras e, após preparação metalográfica, iniciou-se a caracterização das trincas. A Figura 5.2 é uma imagem obtida por microscopia óptica da amostra com e sem ataque químico, sendo possível observar a presença de duas trincas de profundidades diferentes.

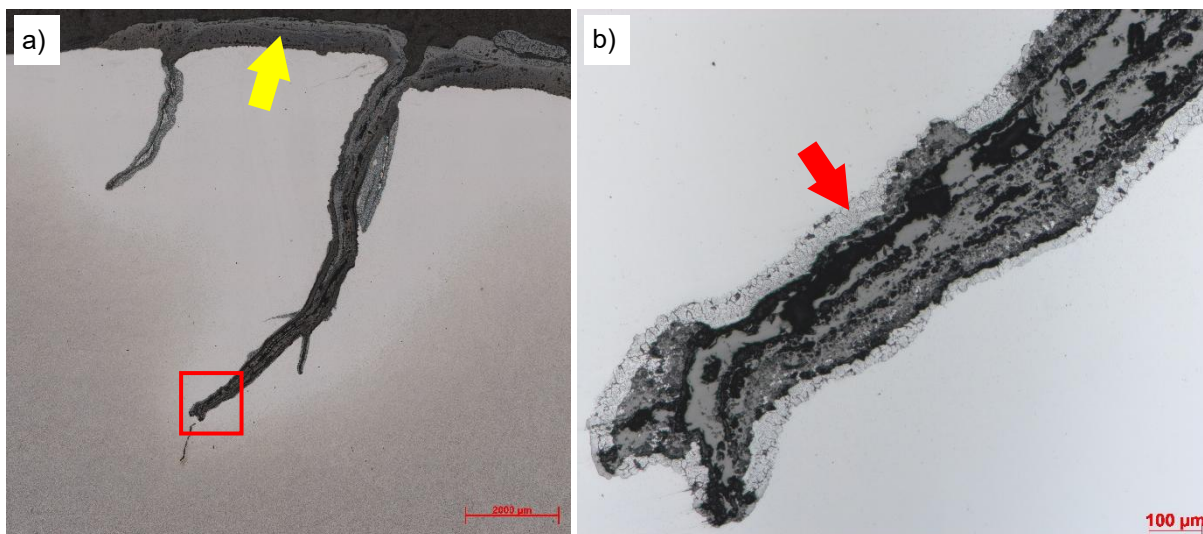


Figura 5.2 – Imagem de MO da amostra de H13 a) ataque com reagente Nital 4%; b) polida.

Observando-se a Figura 5.2 a), tem-se na região superior (completamente preta) a baquelite utilizada para embutimento, e logo abaixo, na região acinzentada indicada pela seta amarela tem-se a carepa de óxidos formada durante o processo de forjamento, e a região em cinza claro é o H13. É possível observar que as trincas formadas apresentam características diferentes, podendo ser mais profundas (cerca de 1 mm), quando houve rompimento/abertura da camada de carepa, ou então mais superficiais quando a carepa não se abriu. Além disso, percebe-se que as trincas podem apresentar ramificações ao longo do material ou não. Outro aspecto relevante é que há uma região ao redor das trincas com microestrutura mais clara após o ataque químico indicando descarbonetização nessa região.

Na Figura 5.2 b) está a extremidade da trinca com maior magnificação – região demarcada pelo quadrado vermelho – sendo possível observar as características dos grãos que se encontram ao redor das trincas – como exemplo indicado pela seta vermelha. Nessa imagem fica evidente a presença de um contorno mais escuro ao redor dos grãos que circundam a trinca, havendo também a presença de pontos pretos entre os grãos, sugerindo a ocorrência de uma oxidação intergranular. Para melhor entendimento dessa região adjacente às trincas observadas nas barras de H13, foram realizadas análises via EPMA. Na Figura 5.3 estão apresentados os resultados semiquantitativos obtidos pela análise via EDS, em forma de mapas de cores, e para esta avaliação foram considerados os elementos oxigênio, silício, ferro, cromo e cobre.

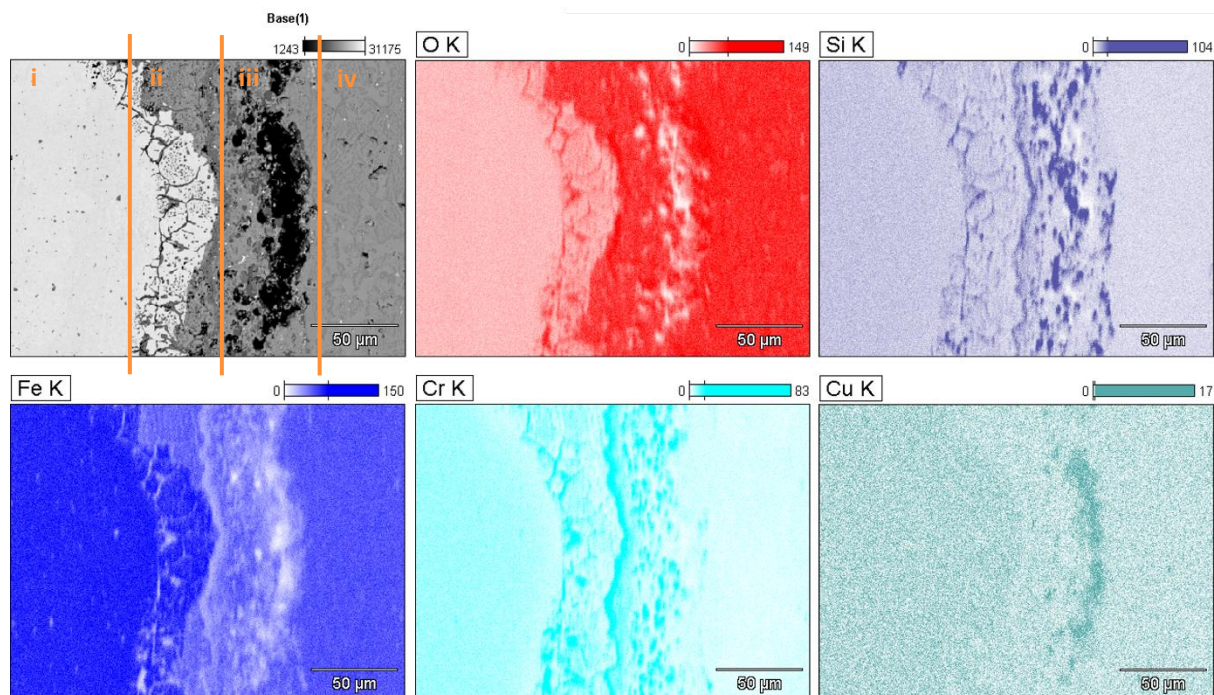


Figura 5.3 – Mapas de EDS amostra de H13 na região adjacente à trinca.

Para analisar a região ao redor da trinca apresentada na Figura 5.3, foi feita uma divisão em 4 regiões principais. Na região “i”, tem-se o aço H13 sem alterações, sendo possível notar todos os elementos – ferro, cromo, cobre – homogeneamente dispersos na matriz, com pouca ou nenhuma presença de oxigênio. Já na região “ii”, nota-se o aparecimento de grãos com uma fase intergranular pronunciada, como já observado nas imagens de MO. Ao comparar os mapas de EDS, na região “ii” tem-se uma baixa concentração aparente de ferro, enquanto elementos como cromo, silício e oxigênio predominam, sendo o indicativo da oxidação preferencial. Já na região “iii”, quase não houve detecção de ferro, detectou-se elevada concentração de oxigênio, cromo e silício e adjacente uma região repleta de cobre. Depois disso, na região “iv”, percebe-se que o material está rico em ferro e oxigênio, indicando a região oxidada da trinca, derivada da carepa formada durante os ciclos de aquecimento.

Foram também realizadas análises de EDS em pontos específicos do redor da trinca, para identificação das fases presentes. Na Figura 5.4 estão duas imagens obtidas via EPMA das regiões internas da trinca de duas amostras de H13 diferentes. Os pontos indicados pelas circunferências amarelas foram analisados de forma semiquantitativa via EDS e os resultados estão apresentados na Tabela 5.1.

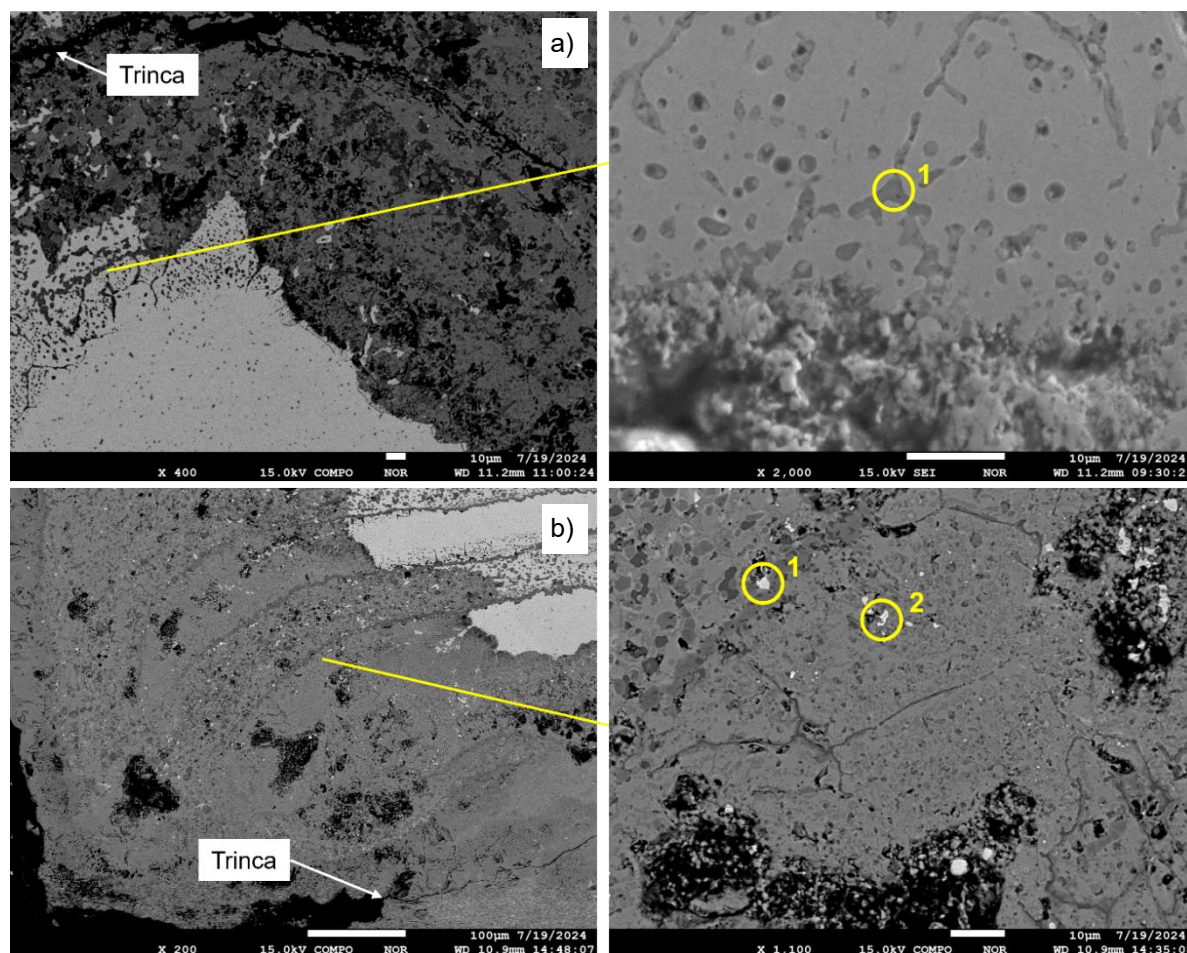


Figura 5.4 – Imagem de EPMA de duas amostras de aço H13, pontos de EDS correspondentes.

Na Figura 5.4 a) está o registro de uma região ao redor da trinca anteriormente discutida como oxidação intergranular, e com o resultado da análise semiquantitativa apresentado na Tabela 5.1, nota-se que de fato os contornos foram oxidados. Já na Figura 5.4 b), tem-se uma região entre a carepa de óxido de ferro formada no processo e o material, sendo possível observar pelos resultados do EDS dos pontos 1 e 2, mostrados na tabela, a presença de fases ricas em cobre.

Tabela 5.1 – Análises semiquantitativas de elementos químicos via EDS.

Ponto	Fe (%p)	Si (%p)	O (%p)	Cr (%p)	Mn (%p)	Ni (%p)	Cu (%p)
1 a)	46,79	12,04	35,60	2,75	2,83	-	-
1 b)	26,23	-	8,31	3,44	-	9,28	52,74
2 b)	40,34	-	15,50	2,74	-	-	41,70

A partir dessas análises, percebe-se que na interface entre a carepa formada na superfície do material – ou na superfície da trinca – e a região que circunda o defeito contendo os grãos afetados, existe uma região com um acúmulo de cobre. A

presença desse elemento em regiões segregadas pelo material pode causar grandes impactos durante ciclos de aquecimento e conformação mecânica, pois a sua temperatura de fusão ($\sim 1.085\text{ }^{\circ}\text{C}$) é mais baixa do que a temperatura de conformação aplicada no H13, a qual está entre $1.150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1.250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na Figura 5.5 está um exemplo extraído da literatura, no qual é possível observar a ocorrência de trincas a quente em uma amostra de aço S355 com e sem ataque químico.

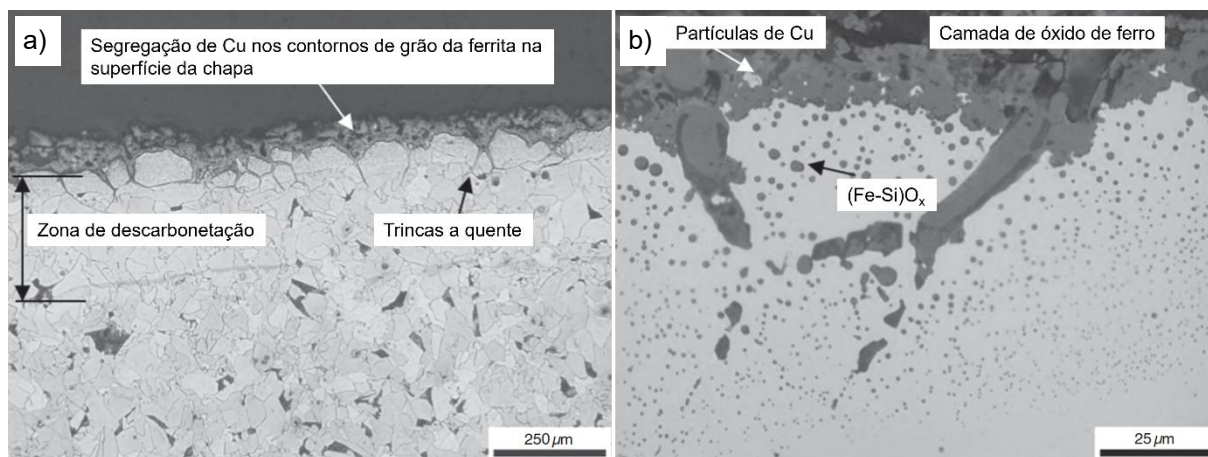


Figura 5.5 – Imagem de MO de amostra de chapa de aço S355 a) Nital 2%; b) polida.

Adaptado de PAPAETHYMIU, 2015.

Ao comparar os resultados obtidos nas análises realizadas no aço H13 com os dados de PAPAETHYMIU, 2015 é possível dizer que o fenômeno observado em ambos os casos é semelhante. Em condições aquecimento ao ar, o ferro oxida na presença de oxigênio e em paralelo o carbono difunde-se do metal para a atmosfera, levando à descarbonetização da superfície. A difusão intersticial do carbono resulta em uma austenita pobre nesse elemento, que se transformará em ferrita, reduzindo a solubilidade do cobre de $\sim 8\%$ em peso para $\sim 3\%$. À medida que a interface aço-carepa avança para dentro do material, o cobre tende a se difundir para os contornos de grão, causando a fragilização a quente. A presença do silício pode reduzir a severidade das trincas, pois ao causar oxidação interna na forma de glóbulos, ele promove a oclusão do cobre na carepa (PAPAETHYMIU, 2015).

Com isso, é possível inferir que durante o aquecimento do lingote de H13 previamente ao forjamento, ocorreu a oxidação da sua superfície. Em função da temperatura e do potencial de oxigênio na atmosfera do forno, a oxidação dos metais presentes no lingote ocorre conforme seleção termodinâmica. A superfície do lingote empobrece em ferro e, conseqüentemente, nessa região a concentração de outros

elementos aumenta, podendo levar à precipitação de fases, devido aos teores acima do limite de solubilidade. No caso do cobre, é possível que ocorra localmente redução da temperatura de fusão, gerando liquefação no aquecimento e irrigação de fase líquida nos contornos de grão e, quando o lingote passa por conformação mecânica, os contornos de grãos fragilizados facilitam a ocorrência de defeitos superficiais como as trincas observadas. Considerando que, para o material descascado, o sobremetal é menor em comparação aos outros acabamentos e este processo não permite remoção deslocada do material, o defeito gerado na conformação mecânica muitas vezes não pode ser removido, ocasionando o refugo.

Corroborando com a discussão realizada, tem-se a Figura 5.6, na qual estão apresentados os mapas de WDS de uma amostra sem defeito. Essa amostra foi obtida a partir de uma barra de H13 que foi submetida ao mesmo processamento que as demais. Isto é, barras que foram obtidas a partir do forjamento de lingotes do aço produzido em EAF, e a única diferença foi a matéria-prima utilizada. Para esse caso, o H13 foi produzido a partir de uma sucata de maior qualidade, a qual provém de uma fonte mais homogênea e passa por melhores critérios de separação, resultando em teores de elementos residuais mais baixos.

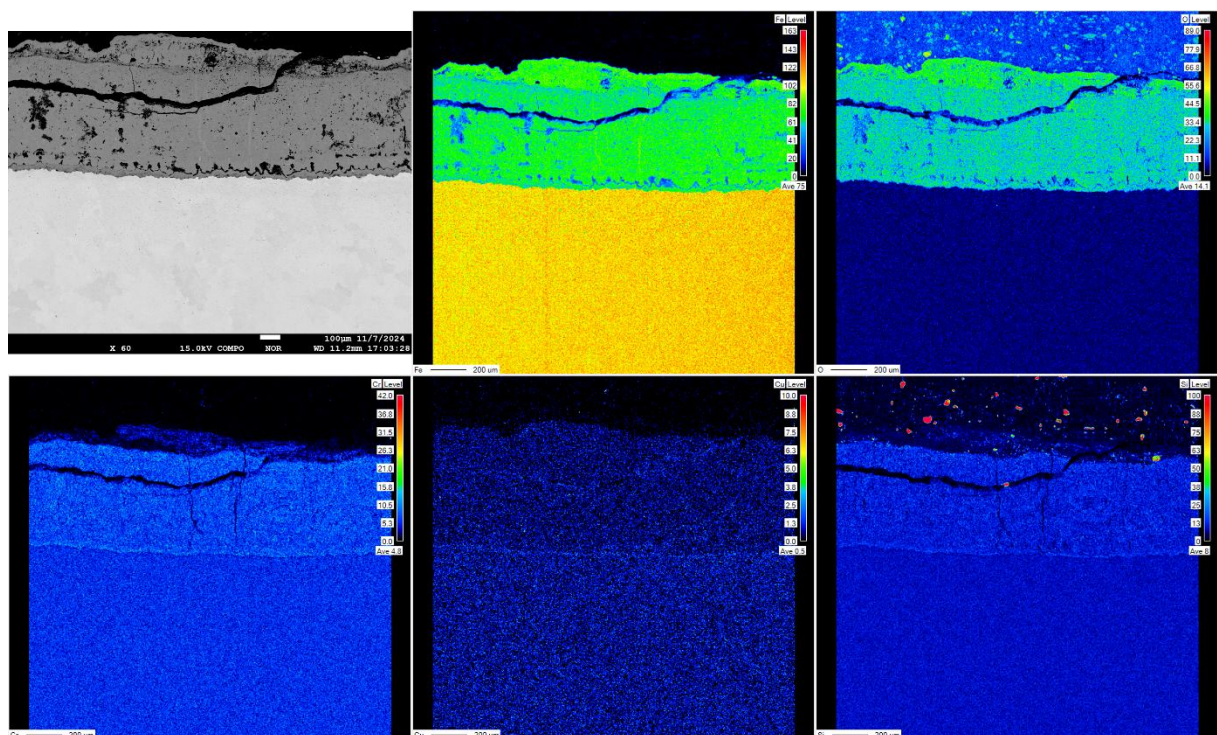


Figura 5.6 – Mapeamento WDS amostra H13 sem defeito.

Na Figura 5.6 é possível observar a carepa formada durante os ciclos de aquecimento e o próprio aço H13. Comparando-se os mapas com o caso do defeito apresentado anteriormente, percebe-se que não há elementos segregados entre a camada de óxido – rica em ferro e oxigênio – e a matriz do aço, na qual os elementos estão completamente dispersos. Tanto o cromo quanto o cobre não estão segregando nas interfaces nem nos contornos de grão, também indicando que não houve oxidação preferencial. No caso desse material sem defeito, a etapa de descascamento foi realizada para remoção da camada superficial e não foram encontradas trincas.

Para comparar as diferentes sucatas que podem ser utilizadas para a produção de um aço ferramenta H13 via EAF, foi construído o gráfico de dispersão com o teor de cobre de cada corrida de aço apresentado na Figura 5.7. Três tipos de sucatas com diferentes teores de elementos residuais são apresentados, classificados como A, B e C, sendo respectivamente menos pura, de qualidade intermediária, e mais pura.

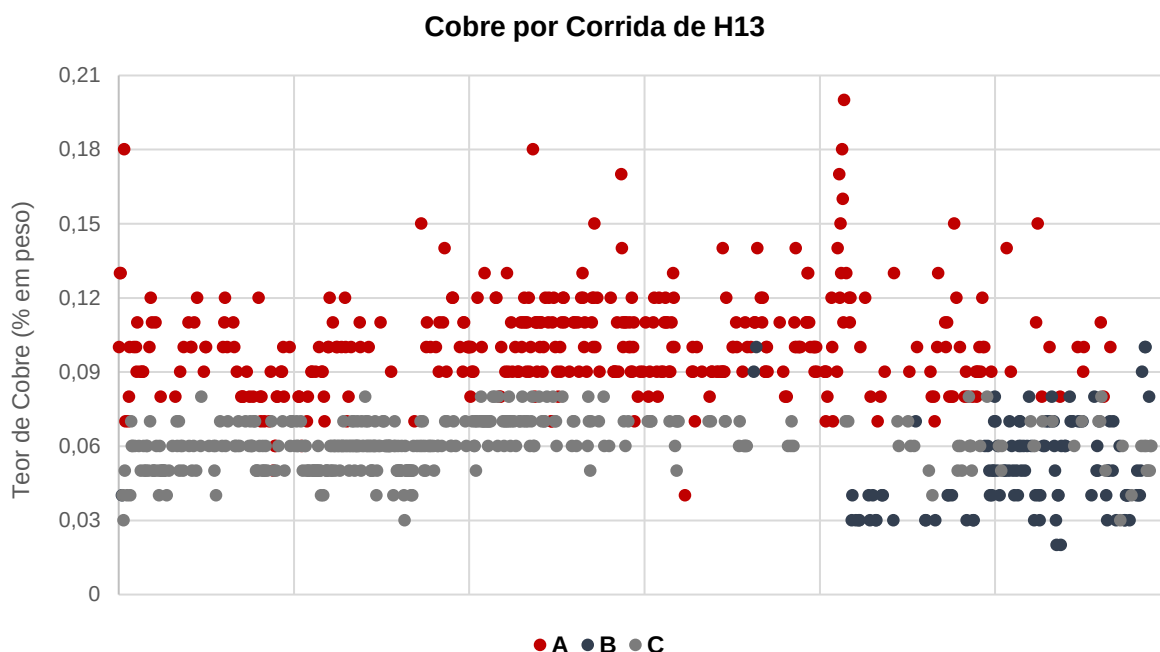


Figura 5.7 – Gráfico de dispersão do teor de cobre no H13 em função da sucata utilizada.

A partir do gráfico, é possível notar que o teor de cobre nas corridas de aço H13 analisadas para o presente trabalho variou de 0,02% a 0,2%, uma ordem de grandeza. Para as corridas cuja sucata consumida – em maior quantidade – foi a sucata A, considerada a de menor qualidade, tem-se que o teor de cobre variou de 0,04% a 0,2%, enquanto para as corridas realizadas utilizando-se a sucata B, a faixa de cobre

analisado no material foi de 0,02% a 0,1%. Já o teor de cobre das corridas de H13 feitas com a sucata de melhor qualidade, ou seja, menores teores de residuais e melhor separação, variou entre 0,03% e 0,08%. A maior faixa de variação foi encontrada para a sucata A, o que já era esperado, pois essa sucata de menor qualidade deriva de processos de separação e obtenção completamente variáveis, podendo não apresentar a mesma característica todas as vezes que é consumida. Já a menor faixa de variação, foi observada para a sucata classificada como sendo a de melhor qualidade, proveniente de fornecedores capazes de controlar a separação.

5.1.2. Energia Absorvida no Impacto

Como processo da análise de qualidade do produto, além das análises microestruturais envolvendo amostras de aço ferramenta H13, resultados de ensaios de impacto Charpy-V também foram analisados. Na Figura 5.8, tem-se os gráficos de energia média absorvida no impacto em função do carbono equivalente – calculado de acordo com a expressão 5.1 – e do teor de cobre, como continuação da análise da influência de elementos indesejados como o cobre presentes nos aços ferramenta.

$$\%C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr+\%V+\%Mo}{5} + \frac{\%Ni+\%Cu}{15} \quad (5.1)$$

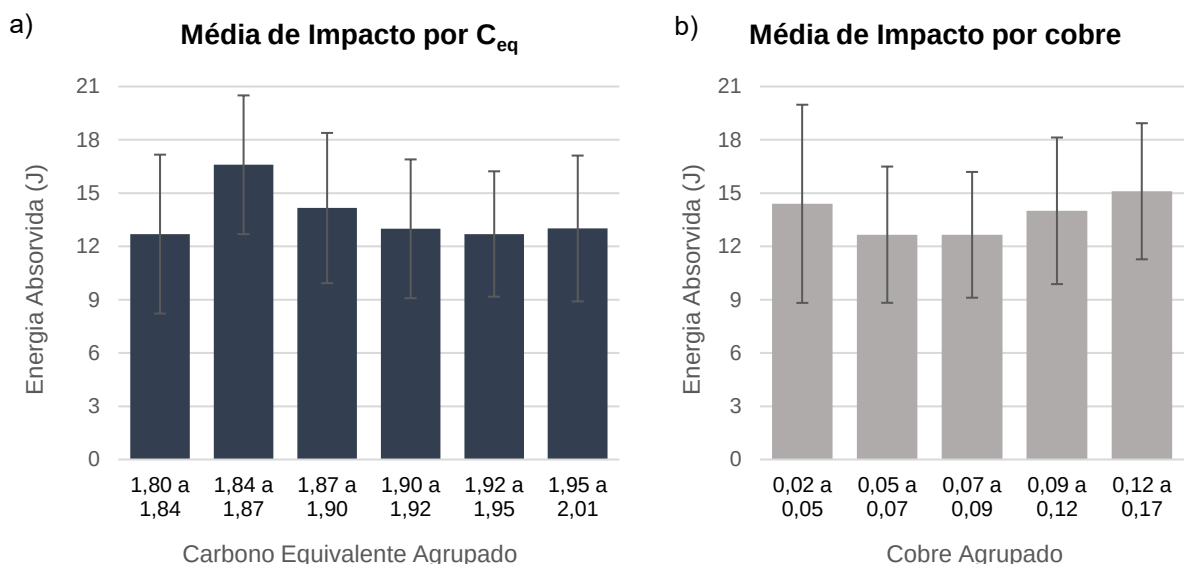


Figura 5.8 – Gráfico de coluna da energia absorvida no impacto média em função do teor a) de carbono equivalente agrupado; b) de cobre agrupado.

Ao analisar os dados de composição das corridas contra os valores de energia absorvida nos ensaios de impacto para ambos os casos, não é possível afirmar uma relação clara e direta entre os elementos e os resultados obtidos. Por mais que exista uma variação dos elementos de liga e, também, dos elementos residuais como o cobre, uma avaliação mais detalhada seria necessária para poder afirmar a sua influência na propriedade de tenacidade do aço ferramenta H13 analisado. Isso porque além da composição química, fatores como processamento, tratamento térmico e microestrutura, influenciam as propriedades mecânicas dos metais.

Outra consideração importante é o fato de que os ensaios foram realizados como controle de qualidade, e dessa forma, ocorreram com o material no fim de linha, e em temperatura ambiente. Como demonstrado na discussão anterior sobre o defeito superficial, a presença do cobre no H13 é um forte indicativo da ocorrência de *hot shortness*, ou fragilidade a quente. Esse fenômeno ocorre em elevadas temperaturas (como no processamento), podendo diminuir o valor de propriedades mecânicas como a tenacidade. Dessa forma, não se observar correlação direta entre o teor de cobre e a energia média no gráfico da Figura 5.8 b) é coerente, pois por mais que o cobre possa alterar as propriedades dos aços ferramenta, os dados obtidos não foram capazes de capturar essa influência devido às condições de análise.

Sabe-se ainda que um ensaio de impacto – assim como de outras propriedades mecânicas – depende intimamente do preparo dos corpos de prova, sendo que qualquer avaria física, por menor que seja, pode comprometer os resultados. Sugere-se que outros estudos relacionados a possíveis influências à energia de impacto sejam realizados, como melhor entendimento de diferenças microestruturais e avaliação mais crítica de elementos residuais mais leves como fósforo e enxofre.

5.2. SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA

A seguir estão os tópicos que compõem o segundo pilar do presente trabalho, sustentabilidade e economia. Primeiramente, serão apresentados os indicadores de sustentabilidade, através da comparação entre dados de usinas produtoras de aços especiais como o H13, diferentes rotas de produção, matrizes energéticas e matérias-primas utilizadas, com exemplos reais do impacto ambiental da utilização de sucata. Por fim, serão discutidos alguns indicadores econômicos, apresentando-se dados do mercado siderúrgico e, também, o impacto da flutuação nos preços de matérias-primas como sucatas e ferroligas.

5.2.1. Indicadores de Sustentabilidade

A indústria de aço é marcada por intenso consumo de matérias-primas, trabalho mecânico e/ou tratamentos térmicos em elevadas temperaturas, e consequentemente é responsável por grande parte das emissões de GEEs. O surgimento da rota EAF como uma alternativa mais sustentável aos processos de fusão e refino desse material é uma das alternativas para a descarbonização dessa indústria. O processo EAF se caracteriza pelo consumo predominante de sucata ferrosa como matéria-prima, resultando em menores emissões por menor consumo de energia primária, uma vez que a fusão de sucata é uma etapa menos intensiva em recursos do que a redução de minério de ferro. No processo BF-BOF, o consumo de energia é substancialmente maior devido à natureza termodinâmica das reações de redução. Fontes energéticas dos processos são diferentes e, no caso da rota EAF, a intensidade de emissões será mais sensível às condições da rede elétrica, seu principal insumo energético.

Seguindo a discussão iniciada em termos de qualidade, faz-se necessária uma análise dos indicadores de sustentabilidade relacionados ao setor siderúrgico. As grandes produtoras de aço estão espalhadas por diferentes países no globo, e com isso é de se esperar que haja diferenças na origem de suas matérias-primas, no método de operação, nos tamanhos das usinas e nas fontes energéticas e elétricas. Foram, então, analisados os relatórios e dados oficiais publicados por 8 empresas do setor que produzem aços especiais como o aço ferramenta H13. Os indicadores são de grande importância para avaliar a performance em termos de sustentabilidade e podem ser divididos em três pilares: social, ambiental e econômico.

No presente tópico, serão discutidos indicadores ambientais, selecionados quanto à relevância para o trabalho. O primeiro deles é Emissão de Dióxido de Carbono Equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), referente à quantidade de GEEs que é emitida diretamente no processo produtivo da empresa (escopo 1), emitida de forma indireta pelo uso de energia elétrica ou de outras fontes (escopo 2), e emitida indiretamente ao longo da cadeia de valor abrangendo matérias-primas, destinação de resíduos, dentre outros (escopo 3). Outro indicador é o Consumo de Energia, diretamente relacionado à eficiência energética, medindo a quantidade de energia consumida para a fabricação dos produtos da empresa. Na Tabela 5.2, estão resumidos dados de produção anual, intensidade de emissão ($\text{t de CO}_{2\text{eq}}/\text{t de produto}$) e intensidade energética (MWh/t de produto), para empresas de diferentes regiões e cuja produção varia entre EAF e BF-BOF.

Tabela 5.2 – Indicadores de Sustentabilidade de Usinas Produtoras de Aço.

Empresa	Produção Anual de Aço Bruto (Mt)	Intensidade de Emissão (t de CO_{2eq}/t de produto)	Intensidade Energética (MWh/t de produto)	Matriz Energética	Referências
ArcelorMittal (Global)	55,30	1,75	N/A	Misto	ARCELOR MITTAL, 2024
Tata Steel (Índia)	20,12	2,40	6,82	Fóssil	TATA, 2024
Nippon Steel (Japão)	34,26	2,20	N/A	Fóssil, Nuclear, Renovável	TRANSITION ASIA, 2023
POSCO (Coreia do Sul)	38,44	2,02	2,75	Fóssil, Nuclear, Renovável	POSCO, 2023
SSAB (EUA/Europa)	7,35	1,46	1,22	Hidrelétrica, Nuclear, Fóssil	SSAB, 2024
Gerdau (Américas)	12,74	0,89	N/A	Baixa intensidade, Hidrelétrica	GERDAU, 2022
Tokyo Steel (Japão)	N/A	0,46	0,45	Fóssil, Renovável	TOKYOSTEEL, 2025
Swiss Steel Group (Europa)	N/A	0,46	2,43	Renovável, Nuclear, Fóssil	SWISS, 2024

A Gerdau, por exemplo, é considerada uma das maiores recicladoras de sucata no mundo, com uma taxa de 70%, e possui usinas em países como Canadá e Brasil, sendo a maior parte do aço produzida pela rota EAF. Analisando-se os dados da empresa, vê-se que o grupo reportou em 2022 uma produção anual de 12,74 Mt de aço, responsáveis por emissões de 9,56 Mt CO_{2eq} para o escopo 1, emissões de escopo 2 de 1,79 Mt CO_{2eq}, e 2,89 Mt CO_{2eq} de escopo 3. Nota-se um destaque para as emissões de escopo 2, as quais foram as menores em comparação com os outros dois tipos de emissões. Em grande parte, esse feito se deve à matriz elétrica dos países onde se encontram as usinas do grupo, como Brasil e Canadá, sendo que a maior parte da eletricidade é gerada a partir de usinas hidrelétricas, conferindo à empresa uma vantagem na produção ambientalmente mais limpa.

Um cenário diferente pode ser percebido analisando-se os dados do grupo SSAB, que opera pela rota BF-BOF na Europa, e rota EAF nos Estados Unidos. A sua intensidade de emissões é maior do que a da Gerdau, mas se assemelha à intensidade da ArcelorMittal, que também é um grupo que opera nas duas rotas produtivas. Essa combinação de produção pode ser uma alternativa para o portfólio de produtos englobar aços especiais, mas também é uma alternativa para a descarbonização. Tanto a intensidade da SSAB quanto da ArcelorMittal encontra-se

abaixo da média global de 1,92 (WORLD STEEL, 2025). No caso da ArcelorMittal, esse valor pode estar associado à alienação de alguns de seus ativos com maior pegada de carbono e ao aumento da participação da produção via EAF, que representou 25% de sua produção global em 2024. Além da rota alternativa, a empresa tem investido em projetos de descarbonização como tecnologias de captura de carbono (ARCELORMITTAL, 2024).

Já as empresas asiáticas, como Tata Steel, na Índia, e POSCO, na Coreia do Sul, enfrentam maiores desafios frente à descarbonização devido à forte dependência de combustíveis fósseis em suas matrizes energéticas. No Japão o cenário é semelhante, sendo que a matriz energética possui baixas frações de energia consideradas renováveis. A maior intensidade de emissões dentre as analisadas é da Tata Steel, usina integrada presente em um país de matriz elétrica ainda dependente de carvão. Os menores valores foram obtidos por Tokyo Steel e Swiss Steel, ambas usinas semi-integradas, sendo que no Japão, por mais que a matriz elétrica seja menos sustentável, a oferta de sucata é capaz de suprir as necessidades. Já no caso da Swiss, no Canadá e na Europa, uma matriz elétrica mais limpa favorece a intensidade de emissões, e ambas conseguem equilibrar as emissões dentre os três escopos e manter uma baixa média.

Direcionando a análise de indicadores de sustentabilidade para o caso do aço ferramenta H13, viu-se no tópico anterior a importância da qualidade das sucatas ferrosas pós-consumo que são inseridas na cadeia produtiva de aços especiais como matérias-primas. No entanto, a disponibilidade de sucata para uso das usinas semi-integradas também afeta indicadores de sustentabilidade como Emissões de CO_{2eq} e Consumo de Energia. HAUPT (2016) demonstraram em seu estudo que as sucatas inseridas nos EAF influenciam diretamente o consumo de eletricidade e a eficiência energética. Os resultados mostraram que sucatas de qualidade inferior – aquelas com teores de elementos contaminantes como cobre e estanho elevados, e com características físicas heterogêneas – como as sucatas de resíduos sólidos urbanos, demandam mais eletricidade no processo de fusão e refino no EAF, ocasionando, consequentemente, um maior impacto ambiental (HAUPT, 2016).

Como apresentado, o impacto ambiental relacionado à produção de aços especiais como o H13 pode variar expressivamente. Com o crescimento das pressões regulatórias relacionadas ao impacto ambiental de diferentes indústrias e uma maior discussão de pautas ambientais relacionadas à mitigação da crise climática, intensas

transformações nos métodos de produção de aço são impulsionadas. A rota elétrica de fusão é, então, divulgada como uma alternativa limpa à rota tradicional BF-BOF, dado que não realiza etapas de mineração e redução, não necessita – diretamente – de carvão e tem como possibilidade a utilização de apenas sucata como matéria-prima. No entanto, é preciso notar que essa rota alternativa pode ser tão poluente quanto a rota tradicional, devido: i) à matriz elétrica da região onde a usina está inserida poder ser completamente dependente da queima de carvão; ii) à localização geográfica e portfólio podem impactar nas emissões indiretas do escopo 3; e iii) à disponibilidade de sucatas de elevada qualidade poder interferir nas cargas do forno.

No cenário analítico da produção do aço ferramenta H13 em uma siderúrgica semi-integrada, foi possível calcular uma estimativa para as diferenças nas emissões de CO_{2eq} variando-se o teor de sucata na carga. A disponibilidade de sucata de qualidade não é um fator que influencia apenas no custo do material produzido ou então na qualidade do produto comercializado como já discutido, mas também na capacidade da produção de aços especiais via EAF impactar menos em termos ambientais. A maior fração da carga metálica inserida em um forno elétrico para a produção de um aço H13 é sucata carbono contendo baixos teores de elementos residuais. Considerando que essa sucata é basicamente composta por ferro, foi possível estimar qual seria o aumento da emissão de CO_{2eq} caso não houvesse material disponível em elevadas quantidades. Nesse cenário, a nova fonte de ferro no processo produtivo seria ferro-gusa, o qual tem uma pegada de carbono estimada em 1,74 t de CO_{2eq}/t de material (CRU, 2022).

Além disso, tem-se que os principais elementos de liga de um aço H13 são cromo, molibdênio, vanádio e manganês, os quais podem ser diretamente adicionados no processo produtivo na forma de ferroligas ou, então, podem ser indiretamente adicionados, quando são elementos presentes na sucata utilizada. As usinas siderúrgicas operam tanto na etapa de fusão e refino, quanto no processamento termomecânico (conformação) dos materiais sólidos, e dessa forma geram sucatas internamente que são reaproveitadas como matéria-prima. Ademais, indústrias que comercializam produtos semiacabados podem implementar programas de economia circular com seus clientes, os quais irão processar o material recebido e sobras de processos como corte e usinagem podem retornar para a usina produtora. Dessa forma, o próprio aço – já com os elementos de liga – pode ser usado como matéria-

prima, e no caso do H13, tem-se parte das adições de cromo, molibdênio, vanádio e manganês realizadas sem ferroligas.

Na Figura 5.9 tem-se um gráfico comparativo entre os dois tipos de substituição citados, e qual seria o impacto a longo prazo. Nesse gráfico estão apresentados dois cenários de redução acumulativa: i) -1,44 tonelada de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ emitidos caso 1 tonelada de sucata de H13 seja consumida em substituição a ferroligas; e ii) -1,87 t de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para cada tonelada de sucata ferrosa consumida ao invés de ferro-gusa. Para um forno de 35 toneladas, por exemplo, a carga poderia ter em média 20 toneladas de sucata carbono, e a indisponibilidade dessa matéria-prima e, conseqüentemente, a substituição por ferro-gusa, causaria um aumento indireto nas emissões de cerca 37,4 toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Considerando-se produções recorrentes e em larga escala, tem-se uma curva de redução de emissões indiretas que chega quase ao dobro da quantidade utilizada, sendo que para 1.000 toneladas de aço carbono reciclado consumido para a produção de H13 via rota EAF – sem a utilização de ferro-gusa – mais de 1.800 toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ deixam de ser emitidas para a atmosfera.

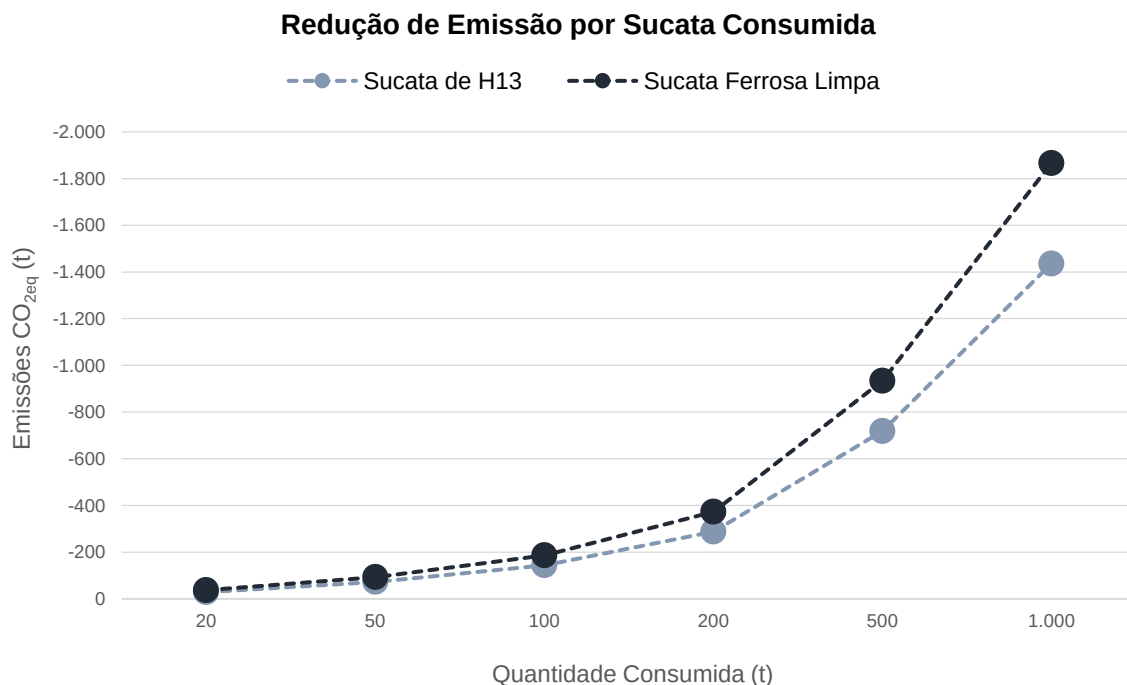


Figura 5.9 – Evolução da redução das emissões em toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ com o consumo (t) de sucata de H13 ou de sucata ferrosa limpa.

Dessa forma, ressalta-se a importância da economia circular mesmo no cenário da produção via rota elétrica. Por mais que a rota EAF seja mais sustentável do que

a rota BF-BOF, por não utilizar diretamente carbono como insumo ou por não realizar processos de redução de minério, é possível atingir números melhores em termos de emissões de CO_{2eq} quando a disponibilidade de sucata de qualidade aumenta.

5.2.2. Indicadores Econômicos

A viabilidade econômica da produção dos aços especiais é um tema tão importante quanto a qualidade da matéria-prima e do produto e os indicadores de sustentabilidade discutidos anteriormente. Fatores econômicos estão diretamente relacionados à disponibilidade de sucata ferrosa de elevada qualidade e aos custos das ferroligas utilizadas para ajustar a composição da liga. Os mercados de matérias-primas são voláteis, principalmente nesse momento de maior demanda por aços com menores pegadas de carbono e crescimento na produção via rota EAF.

O fator mais crítico para as usinas EAF é a disponibilidade de sucata ferrosa. Atualmente, uma parcela significativa da sucata metálica gerada no Brasil é exportada, o que reduz a disponibilidade dessa matéria-prima no mercado nacional. Em termos de preço, internacionalmente há grande influência do mercado dos EUA, mas no Brasil a demanda e os custos de frete são os maiores responsáveis pela volatilidade dos preços da sucata ferrosa. Como já mencionado, a qualidade da sucata é vital para o consumo em aços especiais, mas também é fator determinante no preço, já que sucatas mais bem separadas e com menores teores de elementos químicos indesejados como o cobre, são mais valorizadas. A mesma análise pode ser feita em relação às ferroligas adicionadas no aço durante o processo produtivo. Considerando o cenário da produção do aço ferramenta H13 via EAF, e sabendo que os principais elementos de liga são cromo, molibdênio, vanádio e manganês, pode-se dizer que as ferroligas mais comuns utilizadas são: ferro cromo alto carbono, ferro molibdênio, ferro vanádio, e manganês briquetes (ou eletrolítico). Na Tabela 5.3 foram compilados os valores de mercado das principais matérias-primas já convertidos para R\$/t.

Tabela 5.3 – Variações de preços das principais matérias-primas do aço H13.

Matéria-prima	Preço (R\$/t)	Referência
Sucata Carbono Pesada	900 – 1.100	PLATTS, 2023
Sucata Estamparia	1.200	
Sucata Cavaco	600 – 700	
Ferro-Gusa	2.000 – 2.040	

Ferro Molibdênio	165.388	SMM, 2025
Ferro Vanádio	135.822	INVESTING, 2025
Manganês	9.171	SMM, 2025
Ferro Cromo Alto Carbono	5.660	

A partir dos dados apresentados na Tabela 5.3, nota-se a diferença de valores entre sucatas de baixa qualidade, como cavaco – material de menor rendimento metálico devido à área de superfície e com possibilidade de misturas – e sucatas de maior qualidade como a estamparia. Nesse sentido, também é possível inferir que em cenários econômicos nos quais haja uma escassez de sucata de qualidade, o preço dos aços especiais iria aumentar. Isso porque para garantir as propriedades elevadas de aços como o H13, necessita-se de matérias-primas de maior pureza, sendo o ferro-gusa um substituto para as sucatas de baixos teores de residuais. Percebe-se que essa matéria-prima pode custar o dobro de uma sucata, e considerando elevada pureza em ambos os materiais, a substituição seria 1:1 por simplificação, dobrando-se, então, o custo da fonte de ferro na produção do aço ferramenta H13.

Nota-se, ainda, que os valores unitários mais relevantes são os das ferroligas adicionadas ao aço para ajustes de composição química – etapas necessárias no processo de fusão e refino dos aços, principalmente os especiais. Elementos como vanádio e molibdênio são de difícil extração e refino, passando por processos complexos e disponíveis em menor quantidade na crosta terrestre, o que tende a elevar seus preços. No entanto, a introdução de elementos de liga nos aços também pode ser feita utilizando-se sucatas ligadas – como da própria liga – além da sucata de aço carbono. Então, o consumo de ferroligas pode ser minimizado, economizando-se em termos financeiros e de emissões, como já demonstrado.

Com isso, observa-se uma oportunidade de substituição de matérias-primas. A prática da economia circular é um grande aliado nesse cenário, possibilitando a captação de aço produzido por uma usina, mas processado por outra, e a sua reinserção na cadeia produtiva de forma a aproveitar completamente seus elementos de liga. No caso do H13, é possível dizer que todos os elementos serão recuperados na fusão e a inclusão de ferroligas será feita apenas para correções. O impacto em termos de emissão de CO_{2eq} já foi demonstrado, e na Figura 5.10, está apresentado um gráfico comparativo que ilustra o impacto econômico de diferentes cenários.

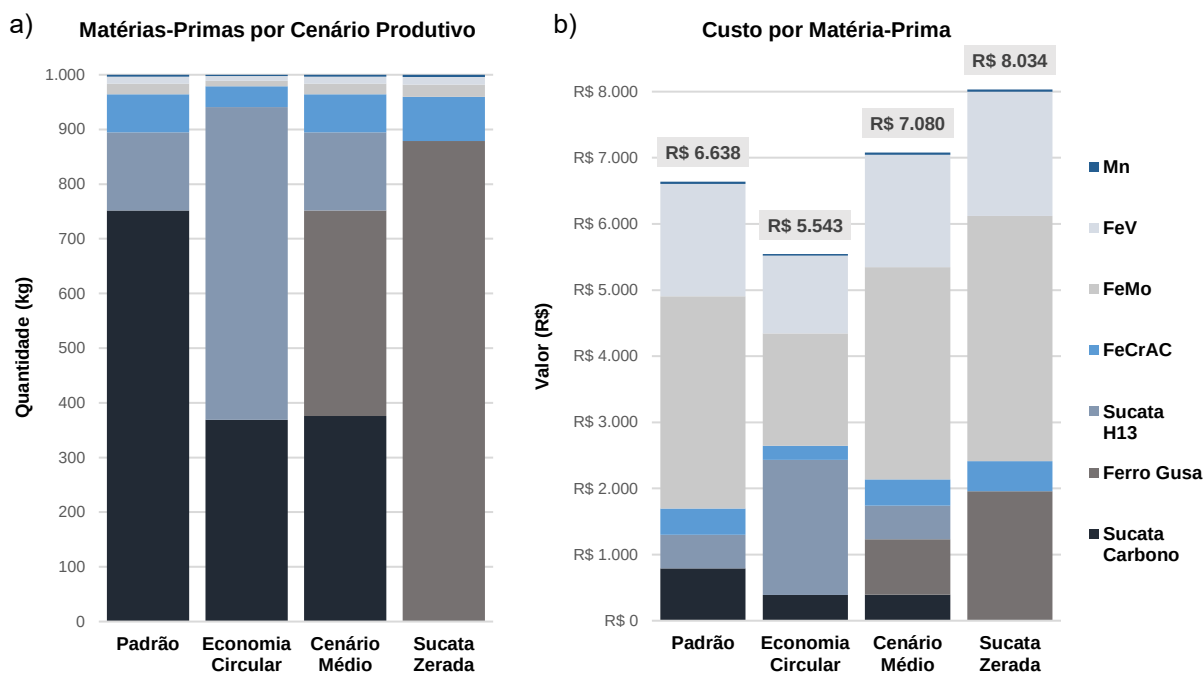


Figura 5.10 – Gráfico de coluna a) da quantidade; e b) do valor correspondente a cada cenário.

A partir dos gráficos, tem-se que o cenário padrão foi calculado com base em uma carga contendo aproximadamente 75% de sucata carbono, sem adição de ferro-gusa, 14% de sucata da própria liga (podendo ser de geração interna) e pequenas correções com ferroligas. Comparando-se então o padrão com os demais cenários, tem-se que uma redução de 16,5% (R\$ 1.095,00/t) no custo por matéria-prima com maior utilização de sucata de H13, mas um aumento de 6,7% caso metade da sucata ferrosa seja substituída por ferro-gusa. Já em um cenário sem disponibilidade de sucata de qualidade, o aumento é de 21% (R\$ 1.397,00/t) no custo da carga.

Pode-se dizer então que a maior economia se dá com a utilização de maior quantidade de sucata do próprio aço, que no caso seria o cenário “Economia Circular”. Produzir um aço H13 tendo como base a própria sucata ligada faz com que a carga vá ao EAF já com uma composição química próxima da final, necessitando menores ajustes no refino. O pior cenário mostrado é aquele que considera uma escassez de sucata de qualidade, tornando necessária a utilização de ferro-gusa como fonte de ferro. Supondo ainda um cenário misto, no qual não haja completa disponibilidade de sucata de qualidade e seja necessário completar as cargas com ferro-gusa, tem-se um aumento de aproximadamente R\$ 442,00 por tonelada de H13 produzido. E isso porque o preço do ferro-gusa é praticamente o dobro do preço de uma sucata ferrosa.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atual necessidade de ações industriais que visem mitigar emissões de GEEs e promover a descarbonização de setores como o siderúrgico é uma pauta crescente. Observa-se que a urbanização tem aumentado, principalmente em países emergentes e, com isso, intensifica-se a demanda por materiais de engenharia como os aços. Um cenário de maior sustentabilidade na siderurgia pode ser alcançado com a produção de aço via rota elétrica – EAF – com a utilização de cargas majoritariamente formadas por sucatas. No entanto, observa-se que disponibilidade e qualidade dessa matéria-prima são conceitos que não se acompanham, podendo inclusive ser limitações uns aos outros. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os impactos dessa relação, estudando a importância da sucata ferrosa na qualidade de produtos de aço H13 e nos impactos em termos de sustentabilidade e custos.

Durante o estudo de caso do aço H13 produzido via EAF, foi possível notar a presença do cobre como elemento residual derivado de sucatas de baixa qualidade e o impacto gerado no produto fabricado. Um aumento no teor de cobre juntamente com a oxidação intergranular preferencial que ocorre no processo de forjamento a quente foi responsável pela formação de trincas superficiais. No aquecimento, a difusão pode ocasionar transformações de fases que alteram a solubilidade de elementos como esse, e trincas são iniciadas em pontos fragilizados durante a conformação mecânica.

Foi possível também observar que sucatas classificadas como de menor qualidade, originadas de produtos no fim de vida que não passam por separações detalhistas, provocam aumento no teor de cobre no aço fundido. Logo, as sucatas de baixa qualidade e o cobre podem ser associados a defeitos superficiais no aço H13, como as trincas que sugerem ocorrência de *hot shortness*. Entretanto, não foi possível concluir uma relação direta entre o cobre e os resultados de energia absorvida no ensaio de impacto a temperatura ambiente. Além da influência de elementos residuais em propriedades mecânicas ser complexa e a existência de defeitos nos corpos de prova prejudicarem os resultados, também houve limitação no escopo do ensaio. Análises microestruturais avançadas e a investigação de outras propriedades mecânicas devem ser realizadas para verificar os complexos efeitos de elementos residuais na reciclagem do aço H13.

Em relação aos indicadores de sustentabilidade, foi discutido sobre a influência da matriz elétrica nos processos de produção de aço via EAF. Isso porque a fonte energética dessa rota de produção depende quase que exclusivamente de eletricidade, a qual varia entre regiões e países onde as usinas são instaladas. A análise comparativa entre diferentes indústrias do setor indicou que a intensidade energética (MWh/t de produto) pode variar de 0,45 a 2,75, para usinas semi-integradas como a Tokyo Steel e integradas como a POSCO, respectivamente. O estudo feito com a produção de H13 via EAF em termos de variação das emissões com a alteração das matérias-primas indicou que o uso de sucata ferrosa de qualidade ao invés do uso de ferro-gusa pode reduzir as emissões em até 1,87 t de CO_{2eq} por t de sucata consumida. Ademais, a realização de projetos de economia circular visando consumir sucatas (sobras) do próprio aço H13, considerada uma sucata já ligada, ao invés de consumir maiores quantidades de ferroligas, pode reduzir as emissões em aproximadamente 1,44 t de CO_{2eq} por t de sucata consumida.

Por fim, a análise de custos realizada com base na criação de quatro cenários de consumo de diferentes matérias-primas permitiu avaliar também os impactos econômicos da utilização de sucata. Foi demonstrado com valores reais que um maior consumo de sucata ferrosa (aço carbono) ao invés do consumo de ferro-gusa pode levar a uma economia de aproximadamente R\$ 1.397,00 por tonelada de H13 produzido. Já o consumo de uma maior quantidade de sucata ligada do próprio aço H13 leva a uma economia de cerca de R\$ 1.095,00 por tonelada de produto quando comparada com o consumo de sucata ferrosa e até R\$ 2.491,00 por tonelada de aço são economizados se comparado com o consumo de ferro-gusa.

Os diferentes cenários avaliados permitiram um entendimento sobre o impacto da utilização de sucatas para a produção de aço em termos de qualidade, custos e sustentabilidade. Foi possível perceber a complexidade do setor siderúrgico, enfatizando a necessidade de ações conjuntas que visem a melhoria dos processos como um todo para uma mitigação de impactos efetiva. Novas análises em termos de qualidade e processo podem agregar nas discussões sobre os limites e as influências de diferentes elementos residuais nas diferentes classes de aço, e como o aumento da aceitação dos produtos frente a esses elementos pode ser benéfica para aumento da disponibilidade e do consumo de sucatas.

REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL. **Sustainability Report 2024**. Disponível em: <https://corporate-cm-prod.arcelormittal.com/media/3fwar2wu/2024-sustainability-report.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). A681: Standard Specification for Tool Steels Alloy. West Conshohocken, 2024. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, 2025. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16229: Sucata de ferro fundido e aço. Rio de Janeiro, 2013. 9 p.

BELL, S. et al. **Final Report on Effect of Impurities in Steel**. March, 2006. DOI: 10.13140/RG.2.2.33946.85440. Acesso em: 10 abr. 2025.

CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 910 p.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. São Paulo: ABM, 2005. 599 p.

CRU International Limited. **EmissionsAnalysis Executive Summary**, 2022. Disponível em: <https://globalsteelclimatecouncil.org/wp-content/uploads/2023/07/CRU-Emissions-Analysis-Executive-Summary-7-22.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **O que é a economia circular**. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt>. Acesso em: 20 mai. 2025.

GERDAU. **Relatório Anual 2022**. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2024/01/relatorio-anual-gerdau-2022-pt.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

HAGEDORN, W. et al. More than recycling – The potential of the circular economy shown by a case study of the metal working industry. **Journal of Cleaner Production**, Volume 377, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134439>. Acesso em: 31 mar. 2025.

HAUPT, M. et al. Influence of Input-Scrap Quality on the Environmental Impact of Secondary Steel Production. **Journal of Industrial Ecology**, Volume 21, N. 2, 2016, p. 391-401. Disponível em: DOI: 10.1111/jiec.12439. Acesso em: 31 mar. 2025.

INESFA – INSTITUTO NACIONAL DE RECICLAGEM. Diferentes tópicos. Disponível em: <https://www.inesfa.org.br/>. Acesso em: 17 mai. 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em <https://www.acobrasil.org.br/site/>. Acesso em 26 abr. 2025.

INVESTING, Site de Investimentos, Bolsas de Valores, Finanças e Economia. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/ferro-vanadium-80-min-united-states-futures-historical-data>. Acesso em: 21 jun. 2025.

KAPOOR, I.; DAVIS, C.; LI, Z. Effect of Residual Elements during the Hot-Working Process of Steel Production: A Critical Review. *Steel Research International*, Volume 95, 2024. DOI: 10.1002/srin.202400116. Acesso em: 15 abr. 2025.

KIM, J. et al. Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. **Energy Research & Social Science**, Volume 89, 102565, July 2022, p. 1-32. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>. Acesso em: 09 abr. 2025.

LI, X. et al. Material Metabolism and Environmental Emissions of BF-BOF and EAF Steel Production Routes. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, Volume 39, No. 1, May 2017, p. 50-58. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1324440>. Acesso em: 15 abr. 2025.

MADIAS, J. Electric Arc Furnace. In: SEETHARAMAN, S. **Treatise on Process Metallurgy**: Volume 3: Industrial Processes. Elsevier, 2014. Cap. 1.5, p. 271-300. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00013-4>

MORNINGSTAR, Inc. Disponível em: <https://www.morningstar.com/>. Acesso em 24 jun. 2025.

PAPAEFTHYMIU, S.; GOULAS, C.; PANTELEAKOU, V. Study on the evolution mechanism of oxidation and copper diffusion and precipitation phenomena and their effect on the surface quality of steel plates. **International Journal of Structural Integrity**, Volume 6, N. 2, 2015, p. 214-224. DOI 10.1108/IJSI-08-2013-0018. Acesso em: 10 jun. 2025.

PLATTS, S&P Global. **World Steel Review**, Volume 23, Edição 30, 2 de agosto de 2023. Disponível em: [world-steel-review 20230802.pdf](https://www.platts.com/products/world-steel-review/20230802.pdf). Acesso em: 21 jun. 2025.

POSCO. 2023 POSCO Sustainability Report. Disponível em: https://sustainability.posco.com/assets/file/POSCO_Sustainability_Report_2023_eng.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025

RAABE, D. The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys. **Chemical Reviews**, Volume 123, Issue 5, February 2023, p. 2436-2608. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>. Acesso em: 26 mar. 2025.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool Steels**. 5 ed. ASM International, 1998. 364 p.

SILVA, A. L. da C. e; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 4 ed. rev. São Paulo: Blucher, 2021. 576 p.

SMM, Mercado de Metais de Xangai. Disponível em: <https://www.metal.com/pt/home>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SSAB. SLB Progress Report: Annual Sustainability-Linked Finance Progress Report 2024. Disponível em: <https://www.ssab.com/-/media/files/company/investors/debt-investor-materials/20250506-ssab-slb-progress-report-final.pdf?m=20250512100842>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SWISS STEEL GROUP. **Non-Financial Report 2024**. Disponível em: https://swisssteel-group.com/content-media/documents/annual_report/2024/Non-Financial-Report-2024.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

TATA STEEL. **Annual Report 2023-2024**. Disponível em: <https://www.tatasteel.com/investors/integrated-report-2023-24/index.html>. Acesso em: 21 jun. 2025.

TOKYOSSTEEL. **Environmental Initiatives**. Disponível em: <https://www.tokyosteel.co.jp/eco/english/about/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

TRANSITION ASIA. **2023 SUSTAINABILITY REPORT UPDATES FOR NIPPON STEEL, JFE HOLDINGS AND KOBE STEEL**. Disponível em: <https://transitionasia.org/wp-content/uploads/2023/10/TA-Sustainability-Reports-2023-Japan-2.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

VIDAL, O.; GOFFÉ, B.; ARNDT, N. Metals for a low-carbon society. **Nature Geoscience**, Volume 6, November 2013, p. 894-896. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo1993>. Acesso em: 07 abr. 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Disponível em: <https://worldsteel.org/>. Acesso em: 11 abr. 2025.