

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, CONTABILIDADE E ATUÁRIA
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

**SETOR DO AÇO BRASILEIRO: TENDÊNCIAS PARA 2035, DESAFIOS E BOAS
PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR**

Solange Yukari Akiama

Orientadora: Profa. Dra. Renata Giovinazzo Spers

SÃO PAULO
2024

Prof. Dr. Carlos Gilberto Carlotti Junior
Reitor da Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Maria Dolores Montoya Diaz
Diretora da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária

Prof. Dr. João Maurício Gama Boaventura
Chefe do Departamento de Administração

Prof. Dr. Felipe Mendes Borini
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Administração

SOLANGE YUKARI AKIAMA

**SETOR DO AÇO BRASILEIRO: TENDÊNCIAS PARA 2035, DESAFIOS E BOAS
PRÁTICAS DE ECONOMIA CIRCULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração do Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Giovinazzo Spers

Versão corrigida

SÃO PAULO
2024

Catálogo na Publicação (CIP)
Ficha Catalográfica com dados inseridos pelo autor

Akiama, Solange Yuraki.

Setor do aço brasileiro: tendências para 2035, desafios e boas práticas de economia circular / Solange Yuraki Akiama. - São Paulo, 2024.

103 p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2024.

Orientador: Renata Giovinazzo Spers.

1. Economia circular. 2. Aço no Brasil. 3. Tendências 2035. 4. Mercado de Carbono. 5. Sucata. I. Universidade de São Paulo. Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária. II. Título.

*A minha mãe Thereza (in memoriam), que sempre
me apoiou e acreditou nos meus sonhos*

AGRADECIMENTOS

Com um sentimento de profundo reconhecimento, aproveito este momento para expressar minha gratidão a todos que contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Dirijo um agradecimento especial à estimada professora doutora Renata Giovinazzo Spers, cuja orientação perspicaz e rigor acadêmico foram pilares fundamentais não só para este projeto, mas também para o meu contínuo desenvolvimento profissional.

Sou especialmente grata aos professores doutores Flávio Hourneaux Junior, Roberta de Castro Souza Pião, Samantha Mazzero e Daniel Estima de Carvalho pelas valiosas críticas e contribuições durante a banca de defesa desta dissertação, o que me permitiu maior refinamento e apuro da pesquisa.

Agradeço a todos os professores e funcionários da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária da Universidade de São Paulo, pelo excelente ambiente e pelo conhecimento que me proporcionaram. E a todos os colegas com quem ali tive o prazer de conviver.

Pude igualmente contar com grande empenho dos meus entrevistados, que se esforçaram ao máximo para me atender e fornecer tão valiosas respostas.

Estendo também minha gratidão aos mentores e amigos Ivan Ciruelos, Rubiane Antunes e Carlos Morimoto, cujas experiências compartilhadas foram fonte de inspiração e colaboração valiosa.

Por fim, agradeço a minha família, base fundamental para meus projetos.

RESUMO

O setor do aço é fundamental para o crescimento e desenvolvimento econômico. Entretanto, sua cadeia produtiva utiliza intensivamente recursos naturais e energia, o que significa 7% das emissões globais de dióxido de carbono, um dos principais fatores do aquecimento global. Por isso, são necessárias reformas profundas nas operações e estratégias empresariais, buscando diminuir sua contribuição para o aquecimento global. Em todo o mundo, as siderúrgicas estão adotando medidas para reduzir e compensar suas emissões, com uma tendência crescente para a incorporação de fontes de energia limpas e inovações tecnológicas que promovam a produção de aço com menor impacto ambiental. Essa estratégia se baseia em adotar práticas mais sustentáveis por meio da economia circular, modelo fundamentado na migração da cadeia linear para a cadeia circular, incentivando a redução, a reutilização, a remanufatura e a reciclagem dos recursos empregados durante as etapas do ciclo do aço. O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro e o nono produtor de aço mundial, o que leva o setor do aço brasileiro a se inserir nesse cenário de transformação inadiável. Para contribuir com esta transição, neste trabalho o objetivo é mapear as tendências para 2035 do setor do aço brasileiro, considerando o arcabouço da economia circular. Além disso, pretende-se identificar os desafios a serem endereçados, bem como mapear as melhores práticas das empresas do setor. Para tanto, esta pesquisa foi concebida como uma investigação qualitativa e utilizou uma amostragem proposital, composta por especialistas com notório saber e que atuam nas diversas etapas da cadeia do aço no Brasil. As principais tendências identificadas apontam para: i) a economia circular como um novo paradigma para o setor siderúrgico; ii) o desenvolvimento tecnológico, em especial as energias renováveis; iii) a consolidação da gestão de resíduos como parte indispensável da cadeia do aço; e iv) a necessidade de incentivos e de regulação de práticas sustentáveis para favorecer uma transição para um cenário de baixas emissões de carbono. Adicionalmente, a pesquisa mapeou os desafios mais relevantes e as boas práticas consoantes a essas tendências, considerando o horizonte de 2035. Em resumo, demonstrou-se que o Brasil está alinhado com as tendências globais de sustentabilidade e de circularidade na cadeia do aço. No entanto, o país apresenta desafios particulares devido às condições de contorno, o que reflete divergências sutis de rota em vez de oposição às tendências mundiais, contribuindo assim para lançar as bases dos rumos necessários para manter o país em linha com as transformações globais do setor.

Palavras-chave: Economia circular. Aço no Brasil. Tendências 2035. Mercado de carbono. Sucata.

Akiama, S. Y. (2024). *Brazilian steel sector: Trends for 2035, challenges and best practices for circular economy* (Master's Thesis). Programa de Pós-Graduação em Administração, Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Atuária, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ABSTRACT

The steel sector is crucial for the economic development and growth. However, its current production chain presents a strong demand for natural resources and energy, representing 7% of global carbon dioxide emissions. To improve the sustainability of the sector, profound reforms in operations and business models are necessary to reduce its impact on global warming. Worldwide, steel mills are adopting measures to become more sustainable through the incorporation of clean energy sources and technological innovations that promote steel production with lower environmental impact, optimizing the usage of resources and reducing CO₂ emissions. Another key point is the evolution of the sector from a linear chain to a circular economy, encouraging the reduction, reuse, remanufacturing, and recycling of resources used throughout all stages of the steel cycle. Brazil is the second largest producer of iron ore and the ninth largest producer of steel in the world. This positions the Brazilian steel sector to insert itself into this scenario of inevitable transformation. To contribute to this transition to a more sustainable model, this work aims to map the trends of the Brazilian steel sector for 2035. It also identifies challenges to be faced and maps the best practices among sector companies. This research was conceived as a qualitative investigation and used purposive sampling. Experts with recognized knowledge working at various stages of the steel chain in Brazil were selected. The main trends identified point to: (a) the circular economy as a new paradigm for the steel sector; (b) technological development, especially renewable energy sources; (c) consolidation of waste management as an indispensable part of the steel chain; and (d) the need to implement incentives and regulation of sustainable practices to favor the transition to a low-carbon emission scenario. Additionally, the research mapped the most relevant challenges and good practices according to these trends. In summary, the research reveals that Brazil is aligned with global trends of sustainability and circularity in the steel chain. However, it presents particular challenges due to the country's conditions, reflecting subtle route divergences instead of opposition to global trends.

Keywords: circular economy. Steel in Brazil. 2035 trends. Carbon market. Scrap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama circular genérico para metais, com os principais processos.....	33
Figura 2 – Rotas de produção de aço e as principais tecnologias	34
Figura 3 – Esquema simplificado das etapas da cadeia do aço agregada à circularidade	38
Figura 4 – Priorização dos desafios: etapas × dimensões.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intensidade de energia e de emissões globais.....	40
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Matriz de tendências: estratégias × etapas do ciclo do aço	49
Quadro 2 – Resumo da caracterização definida para os participantes do painel de especialistas entrevistados	51
Quadro 3 – Estrutura da entrevista com os especialistas	54
Quadro 4 – Matriz de amarração de Mazzon	56
Quadro 5 – Resumo da caracterização do painel de especialistas entrevistados na pesquisa ..	59
Quadro 6 – Consolidação de tendências, desafios e boas práticas	81
Quadro 7 – Etapas do ciclo do aço × dimensões	98

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA DE PESQUISA.....	23
1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO	24
1.2.1 Objetivo geral.....	24
1.2.2 Objetivos específicos e questões de pesquisa.....	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 PANORAMA DO SETOR DO AÇO NO BRASIL.....	25
2.1.1 Político	25
2.1.2 Econômico	26
2.1.3 Social.....	26
2.1.4 Tecnológico.....	27
2.1.5 Ambiental	28
2.1.6 Legal.....	28
2.1.7 Discussão	29
2.2 ECONOMIA CIRCULAR E O SETOR DO AÇO	30
2.2.1 Ciclo de produção do aço	31
2.2.1.1 Rotas de produção de aço	33
2.2.1.2 Sucata de aço.....	35
2.2.1.3 Simplificação das etapas da cadeia do aço.....	37
2.2.2 Emissões e energia na cadeia do aço	39
2.3 TENDÊNCIAS E DESAFIOS DO SETOR DO AÇO.....	40
2.3.1 Mineração e refino.....	42
2.3.2 Transformação.....	44
2.3.3 Projeto e manufatura de produtos.....	44
2.3.4 Uso dos produtos.....	45
2.3.5 Gestão de resíduos	47

3 METODOLOGIA	51
3.1 POPULAÇÃO E SELEÇÃO DA AMOSTRA.....	51
3.2 ELABORAÇÃO DA ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA.....	52
3.3 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS.....	54
3.4 MATRIZ DE AMARRAÇÃO.....	55
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESPONDENTES DA PESQUISA.....	57
4.2 TENDÊNCIAS DO SETOR DO AÇO PARA 2035 NO BRASIL	60
4.2.1 Mineração e refino	61
4.2.2 Transformação (ligas e laminação)	63
4.2.3 Projeto e manufatura de produtos	63
4.2.4 Uso dos produtos	65
4.2.5 Gestão de resíduos	65
4.2.6 Comparação entre tendências apontadas pelos entrevistados e tendências globais	69
4.3 DESAFIOS	71
4.3.1 Tecnologia	71
4.3.2 Modelos de negócios	73
4.3.3 Regulação	74
4.3.4 Priorização dos desafios por dimensões	75
4.3.4.1 <i>Tecnologia</i>	76
4.3.4.2 <i>Modelo de negócio</i>	77
4.3.4.3 <i>Regulação</i>	77
4.4 BOAS PRÁTICAS.....	77
4.4.1 Tecnologia	77
4.4.2 Modelos de negócios	79
4.4.3 Regulação	79

4.5 RESUMO	80
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
5.1 TENDÊNCIAS PARA 2035	83
5.2 DESAFIOS	85
5.3 BOAS PRÁTICAS	86
5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	86
5.5 SUGESTÕES PARA ESTUDO FUTUROS.....	87
REFERÊNCIAS	89
ANEXO I: ROTEIRO DA ENTREVISTA	97
ANEXO II: TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO	99
APÊNDICE I: MINIBIOGRAFIA DOS ENTREVISTADOS	101

1 INTRODUÇÃO

Na última década, a produção mundial de aço cresceu 2,5% ao ano, atingindo 1,951 bilhões de toneladas, com utilização média da capacidade produtiva, no mesmo período, de 70,8%. O aço desempenha um papel vital na economia global, gerando mais de US\$ 2,5 trilhões em receita e empregando cerca de 6 milhões de pessoas (WSA, 2021).

Nesse período, a indústria siderúrgica tornou-se ao mesmo tempo altamente competitiva e fragmentada: os dez maiores produtores de aço respondem por apenas 25% da produção global. Acrescenta-se a isso a alta complexidade de sua cadeia produtiva, haja vista que os maiores produtores da principal matéria-prima, o minério de ferro, são países com baixo consumo de aço, como Austrália e Brasil, o que resulta em grande esforço logístico a fim de suprir a demanda dos países que mais consomem o produto – China, Estados Unidos e Índia (IRENA, 2023). Em 2021, por exemplo, a China foi responsável por cerca de 56% e 57%, respectivamente, da demanda e da produção global de aço (WSA, 2021).

Segundo estimativas da International Energy Agency (IEA), os principais setores que consomem aço no mundo são os seguintes: edificações (33%), infraestrutura (22%), máquinas e equipamentos (17%), veículos (15%) e bens de consumo (13%) (IEA, 2020). A cadeia de produção que supre esse consumo (mineração, refinamento, ligas, laminação, manufatura, uso e descarte) ainda é essencialmente linear e demanda muitos recursos naturais, alto consumo energético, logística intensiva e alta emissão de dióxido de carbono (CO₂), gerando grande impacto ambiental – embora hoje já se entenda que o aço é um candidato natural à economia circular (Lopez, Farfan, & Breyer, 2022). Nesse sentido, é de se notar que o setor do aço é o maior emissor industrial de CO₂, sendo responsável por 7% (2,6 gigatoneladas) do total de emissões diretas relacionadas a combustíveis fósseis (IEA, 2023b), seguido pelo setor de cimento com 6,5% (2,4 gigatoneladas) e químicos com 3,6% (1,3 gigatoneladas). Em 2022, por exemplo, foi gerada cerca de 1,9 toneladas de CO₂ para cada tonelada de aço produzida (WSA, 2023b).

Em vista do exposto, para que as metas de redução das emissões de CO₂ no setor de aço sejam atingidas, os processos e o modelo de negócio das siderúrgicas precisarão ser ajustados, o que passa, dentre outros fatores, por investimentos na implementação contínua de novas tecnologias e infraestruturas que levem, por exemplo, à utilização majoritária de fontes de energia renovável, à busca por maior rendimento no uso de todas as matérias-primas e à valorização dos resíduos no processo produtivo (IEA, 2023a). Estas são melhorias que, num primeiro momento, representarão aumentos consideráveis nos custos de produção (Carvalho, 2024). Portanto, será

necessário criar políticas públicas e regulações que favoreçam investimentos em pesquisas e em infraestrutura, o que envolve as esferas macro, meso e micro das instituições do sistema (Melo & Silva, 2022).

Na Europa, região responsável por 15% da produção mundial de aço, as empresas siderúrgicas foram as primeiras a estabelecer metas para neutralizar suas emissões de GEE até 2050, por meio de novos caminhos tecnológicos. Por sua vez, o setor de aço brasileiro também já começou a trabalhar em vista dessa mesma meta (Gerdau, 2024). Estima-se que o grupo indo-europeu ArcelorMittal, por exemplo, já investiu aproximadamente 300 milhões de euros no desenvolvimento de tecnologias de carbono neutro, pretendendo chegar a 10 bilhões de euros até 2030. De acordo com a área de sustentabilidade da empresa no Brasil, dentre as iniciativas de curto prazo do grupo aqui no país estão o aumento do uso de sucata como matéria-prima, a utilização de gás natural e a otimização do carvão vegetal – que substitui parte dos finos de carvão mineral injetados nos altos-fornos a coque (ArcelorMittal, 2022a, 2022b).

Ainda no Brasil, a multinacional Gerdau recentemente assinou um acordo para comprar 33,33% da Newave Energia, adquirindo o direito a 30% da energia produzida pela empresa (Canal de Energia, 2022). A Gerdau investiu 500 milhões de reais na Newave ao longo de 2023 e mais 1,5 bilhão de reais nos anos subsequentes, beneficiando-se do desenvolvimento de projetos *greenfield*, *brownfield* e atividades de comercialização de energia elétrica. Com expectativa de início para 2025 e 2026 e com capacidade de aproximadamente 2,5 gigawatts, a geração de energia seria exclusivamente solar ou eólica teria, usufruindo do imenso potencial brasileiro de gerar energia a partir de fontes renováveis, o que nos coloca, nesse quesito, numa posição muito vantajosa.

As siderúrgicas estão avançando com suas metas intermediárias de redução das emissões escopo 1 (atividade principal) e escopo 2 (energia). Simultaneamente, elas vêm desenvolvendo uma série de projetos para atingir a meta de neutralização das emissões de CO₂ até 2050 (IEA, 2020). Existem, assim, alguns casos disruptivos que estão descritos abaixo acordo com o documento da International Energy Association (2020).

Fundada em 2022, a siderúrgica sueca H2 Green Steel deve entrar em operação em 2024. O plano da companhia é produzir, sem nenhuma emissão de CO₂, 5 milhões de toneladas anuais de aço a partir de 2030. Para tanto, há dois fatores importantes: a energia elétrica utilizada será 100% oriunda de fontes renováveis e a empresa utilizará hidrogênio verde em seu processo produtivo, de forma que o subproduto da usina será somente vapor d'água.

A União Europeia, inclusive, anunciou planos ambiciosos para as energias renováveis em sua matriz energética. A meta é que até 2050 ele passe dos atuais 2% para cerca de 13% a 14% do total da energia consumida no bloco, o que será levado a cabo mediante investimentos

em da ordem de meio trilhão de euros nas próximas três décadas, com uma geração esperada de até 1 milhão de novos empregos diretos e indiretos (Alacero, 2022). Na mesma linha, o presidente Joe Biden também incluiu energias renováveis na política energética de médio e longo prazos dos Estados Unidos, estabelecendo como objetivo reduzir o custo do hidrogênio renovável em 80% até 2030 (Alacero, 2022).

Por fim, a Boston Metal, uma *startup* que tem Bill Gates entre seus apoiadores de primeira hora e que atraiu recentemente a mineradora brasileira Vale para sua base de acionistas, promete revolucionar a indústria siderúrgica ao empregar uma tecnologia livre de carvão. A empresa utiliza uma tecnologia desenvolvida por professores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) que permite substituir o carvão por energia elétrica no processo de transformação do minério de ferro em aço.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA DE PESQUISA

Basicamente, a siderurgia utiliza dois insumos metálicos: o minério de ferro e a sucata de aço reciclada. Denomina-se aço primário aquele que resulta de operações em que o minério de ferro é predominante (no máximo 25% de sucata), o que corresponde a 70% do aço produzido atualmente, enquanto o aço secundário tem como seu principal componente a sucata, sendo responsável pelos outros 30% da produção. Na siderurgia primária, o alto-forno é o principal equipamento, e o carvão o principal insumo energético. Já na produção secundária, mais sustentável, é utilizado o forno elétrico. Por fim, energia e matérias-primas, combinadas, costumam responder por entre 60% e 80% dos custos de produção do aço (IRENA, 2023; WSA, 2021).

Tendo em vista esse alto consumo de matéria-prima e energia na produção do aço, em conjunto com a importância de práticas de preservação e redução do impacto ambiental, é necessário que as indústrias encontrem alternativas para os meios de produção atuais. Disso decorre o interesse desta pesquisa: a economia circular do aço. Diferentemente da produção linear, que extrai a matéria-prima, a processa, a utiliza e a descarta, na economia circular, ao final do processo de consumo, o aço volta reciclado ao início da cadeia, o que permite não apenas diminuir a extração de matéria-prima, mas também reduzir a quantidade de energia empregada no processo produtivo (Pauliuk, Wang, & Müller, 2012).

Na contramão de outros produtos, o aço se recicla muito facilmente, e não perde suas características quando reutilizado (WSA, 2023b). À guisa de exemplo: depois da vida útil de um carro, todos seus elementos em aço podem voltar para a gestão de resíduos, para as

siderúrgicas, que podem utilizar até 100% de sucata para produzir aço novamente, fazendo com que sua reutilização seja bastante interessante do ponto de vista ambiental e econômico.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

Esta pesquisa tem os seguintes objetivo geral e específicos:

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo mapear as tendências para 2035 do setor do aço brasileiro, considerando o arcabouço da economia circular, a fim de identificar os desafios a serem endereçados, bem como mapear as melhores práticas para as empresas do setor.

1.2.2 Objetivos específicos e questões de pesquisa

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Mapear as principais tendências para 2035 da economia circular para o setor do aço brasileiro.
- Identificar os desafios relacionados à economia circular apresentados pelos especialistas da cadeia do aço.
- Identificar as boas práticas existentes indicadas pelos especialistas relacionadas à economia circular no setor do aço no Brasil.

No próximo capítulo, serão apresentados os conceitos de economia circular, a metodologia empregada nesta dissertação, baseada numa pesquisa qualitativa, bem como sua forma de análise, e o modo pelo qual foram selecionadas as entrevistas. Para finalizar, há um capítulo que sumariza as tendências, desafios e boas práticas, bem como as limitações e sugestões para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado um panorama do setor e o conceito de economia circular aplicado ao setor do aço, assim como as estratégias de circularidade consideradas ao longo das etapas do ciclo do aço. Por fim, serão indicadas as tendências para a circularidade do setor do aço no Brasil.

2.1 PANORAMA DO SETOR DO AÇO NO BRASIL

O setor de aço desempenha um papel fundamental na economia, sendo um dos pilares para o desenvolvimento de um país, devido à sua vasta aplicação em diferentes indústrias (Instituto Aço Brasil, 2023).

A análise PESTEL, segundo Yüksel (2020) e Issa, Chang e Issa (2014), é um modelo que permite determinar as posições e a importância relativa dos fatores macroambientais que influenciam uma organização. Esses fatores são agrupados em seis categorias principais: políticas, econômicas, sociais, tecnológicas, ambientais e legais, com diversos subfatores em cada categoria. A partir dessa análise é possível obter uma avaliação integrada, racional e objetiva desses fatores, permitindo identificar relações potenciais entre eles, o que auxilia a tomada de decisões estratégicas. Essa análise abrangente oferece uma compreensão holística do ambiente em que a indústria opera, proporcionando uma melhor tomada de decisão e a identificação de oportunidades e ameaças relevantes para o setor do aço no Brasil.

2.1.1 Político

No âmbito político, observa-se uma crescente pressão por parte de clientes internacionais para que fornecedores demonstrem progresso ou planos para atingir o Net Zero, refletindo uma tendência de demanda por políticas de sustentabilidade que vão além das obrigações legislativas. Adicionalmente, o papel do governo na regulação e formalização do setor é discutido como um meio para proporcionar maior estabilidade e estimular práticas de inovação sustentável das empresas, por exemplo a introdução do Mecanismo de Ajuste de Fronteira de Carbono (CBAM, do inglês *Carbon, Border, Adjustment Mechanism*) nos parceiros comerciais da União Europeia (UE) (Magacho, Espagne, & Godin, 2024). Há também uma pressão governamental crescente para a adesão a normativas que enfatizem práticas sustentáveis, incluindo a possibilidade de adoção de normas mais rigorosas e o incentivo a

certificações voluntárias. Em dezembro de 2023 foi aprovado o projeto de lei que regulamenta o mercado de carbono no Brasil (PL nº 2148/2015). O texto cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), que estabelece tetos para emissões e um mercado de venda de títulos.

O governo brasileiro, por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), comprometeu-se com a implementação de estudos para financiar medidas de baixo carbono em vários setores econômicos, incluindo o siderúrgico. Algumas das estratégias sugeridas para esse setor incluem o aumento da reciclagem na rota do forno elétrico a arco (EAF) e a substituição do carvão vegetal por carvão mineral na rota do alto-forno (BF). Os cenários de precificação do carbono têm implicações significativas na política energética para a implementação de contribuições determinadas em nível nacional (NDC) e para a transição para emissões baixas ou nulas no setor industrial. A publicação *Política Energética* investiga os impactos dos cenários de precificação de carbono na implementação das NDC no Brasil (Souza & Pacca, 2021).

2.1.2 Econômico

Na esfera econômica, há a expectativa de impactos futuros decorrentes da precificação do carbono. Esse mecanismo pode levar a um aumento no preço do aço, tendo em vista a internalização dos custos ambientais. Entende-se, portanto, que o setor precisará lidar com os desafios econômicos associados à sustentabilidade ambiental, adaptando-se a um modelo de negócios que considere os custos do carbono e outros passivos ambientais (Ahmadinia et al., 2022).

A sustentabilidade no setor do aço pode ser uma fonte de oportunidades, em razão da possibilidade de geração de créditos de carbono e outras transações do mercado ambiental. Isso indica um potencial para novos fluxos de receita e uma economia de baixo carbono (Sonter, Barrett, Moran, & Soares-Filho, 2015) Adicionalmente, de Silveira e Oliveira (2021) examinam como a precificação do carbono pode afetar a competitividade das indústrias, particularmente aquelas com emissões intensivas, como é o caso da indústria do aço.

2.1.3 Social

A pressão crescente por práticas sustentáveis transcende fronteiras legislativas e passa a ser uma demanda de clientes internacionais significativos e conscientes. Companhias de

renome, como Scania¹ (2023) e Volvo² (2024) exigem que fornecedores nacionais adotem políticas que caminhem ao encontro de objetivos como o Net Zero. Tal tendência de pressão reflete uma mudança paradigmática, segundo a qual empresas líderes de mercado impulsionam fornecedores rumo à sustentabilidade, evidenciando uma nova dinâmica social nos negócios.

Similarmente, iniciativas que ultrapassam as regulamentações vigentes, como certificações voluntárias, apontam para uma inclinação em direção à sustentabilidade que emerge de motivações diferentes das compulsórias, estas últimas fundamentadas em normativas governamentais. Isso denota a existência de um movimento social provocado tanto pela pressão das corporações, que enxergam valor estratégico na sustentabilidade, quanto pelo reconhecimento de que práticas empresariais responsáveis podem funcionar como mecanismos diferenciais e benefícios competitivos.

Adicionalmente, a necessidade de políticas públicas para organizar e viabilizar um ambiente de negócios mais estável e previsível no setor siderúrgico é uma condição relevante para fomentar práticas sustentáveis. Entende-se que a formalização e regulamentação por parte do governo não apenas fornecem incentivos para a adesão a tecnologias limpas e eficazes, mas também criam um ecossistema propício para atividades como reciclagem e reutilização de materiais, agregando valor à responsabilidade social corporativa e, ao mesmo tempo, ampliando o engajamento da sociedade em questões ambientais.

2.1.4 Tecnológico

Trata-se de uma necessidade de inovação e adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, como apontado por Van Soest, Den Elzen e Van Vuuren, (2021), Souza e Pacca, 2021, Fan e Friedmann (2021) e Flores-Granobles e Sayeys (2020), que discorrem sobre a eficiência de recursos e a implementação de tecnologias inovadoras para atingir a sustentabilidade no setor de mineração e metalurgia (Lei et al., 2023).

Segundo Bataille et al. (2023), as tecnologias mais recentes para fomentar a produção de aço de baixo carbono são, por exemplo, as de redução de ferro diretamente com hidrogênio verde ou azul para uso em EAF, e tecnologias de captura e armazenamento de carbono CCS (*Carbon Capture and Sequestration*) e tecnologias CCU (*Carbon Capture and Utilization*), que também envolvem a captura de CO₂, mas, em vez de armazená-lo, utiliza-o em diferentes aplicações, para a produção de cimento e aço. Há ainda a criação de oportunidades para as

¹ Inventário de gases do efeito estufa/ escopo 3/ emissões indiretas da cadeia de valor.

² Emissões da cadeia de suprimentos, 25% menores.

empresas brasileiras se tornarem líderes em produção verde, vendendo inicialmente para mercados desenvolvidos subsidiados e, eventualmente, atendendo a mercados globais e domésticos mais amplos, à medida que a demanda por aço verde se expande (Nogueira & Madureira, 2022).

2.1.5 Ambiental

A crítica ao discurso de sustentabilidade reflete os desafios na implementação efetiva de práticas ambientais sustentáveis na indústria (Sonther et al., 2015; Souza & Pacca, 2021).

A importância de considerar o ciclo de vida do material é reconhecida, assim como a relevância da sucata de produção e de fim de vida útil, enfatizando-se a necessidade de práticas de reciclagem (Mandová, Vass, Pales, Levi, & Gül, 2020).

Alguns desafios da reciclagem e da circularidade são indicados pelos trabalhos de Graedel (2011), que discute a complexidade e os desafios termodinâmicos na reciclagem de metais em sistemas técnicos.

A indústria do aço brasileira investiu, entre 2018 e 2020, mais de R\$ 2,6 bilhões em ações ambientais direcionadas ao aprimoramento dos processos técnicos e programas voltados à sustentabilidade e à redução da emissão de CO₂ na produção do aço (Instituto Aço Brasil, 2020).

2.1.6 Legal

Em 2023, a Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) encaminhou um projeto de lei que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), com base na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), Lei nº 12.187/2009, e no Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. As metas setoriais ainda devem ser definidas, e regulamentações claras que atendam à precificação de carbono e incentivem a promoção da economia circular ainda são uma lacuna que carece de investigação (Silveira & Oliveira, 2021). Além disso, é essencial a criação de políticas públicas que promovam a reciclagem e a formalização do mercado de sucata (Xylyia, Silveira, Duerinck, & Meinke-Hubeny, 2018). Por fim, estudo de Graedel et al. (2019), examina como as regulamentações ambientais internacionais afetam a indústria do aço.

2.1.7 Discussão

O setor do aço no Brasil enfrenta um cenário de mudanças significativas impulsionadas por fatores políticos e econômicos que destacam a importância da integração de práticas sustentáveis. O engajamento governamental, juntamente com a pressão de *stakeholders* e a exploração de mercados emergentes, como o de créditos de carbono, é um aspecto que redefine a dinâmica do mercado do aço, impulsionando o setor em direção à sustentabilidade.

A análise PESTEL do setor do aço brasileiro ressalta diversos temas relevantes para a sustentabilidade, sendo dois deles muito proeminentes: a importância dos créditos de carbono e o conceito de economia circular.

O mercado de crédito de carbono é uma oportunidade econômica significativa para o setor do aço, potencializando um novo mercado e contribuindo para uma economia de baixo carbono. Adicionalmente, destaca os benefícios financeiros que podem ser alcançados pela implementação de processos mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Este tópico é ainda mais relevante à luz das tendências globais que apontam para a crescente precificação do carbono. Instituições internacionais, como a World Steel Association (WSA, 2023b), têm tratado a sustentabilidade como uma prioridade, na qual a compensação de carbono desempenha um papel fundamental para a redução das emissões de GEEs e para o cumprimento dos objetivos do Acordo de Paris.

Quanto à economia circular, ela está intrinsecamente atrelada à sustentabilidade do setor siderúrgico. A reciclagem e a reutilização de sucata de aço são práticas econômicas que reduzem a dependência de recursos primários e o consumo de energia. A formalização e a estruturação do mercado de sucata podem ser impulsionadas por políticas públicas, favorecendo a transição para práticas mais sustentáveis.

Globalmente, a economia circular tem sido promovida como uma abordagem transversal para atender aos ODS das ONU. Iniciativas como a circularidade no uso de materiais ajudam a minimizar o desperdício e a emissão de poluentes, fortalecendo a resiliência e contribuindo para a sustentabilidade do setor do aço.

Portanto, o setor do aço brasileiro, alinhado com as tendências e com as dinâmicas globais, deve avançar no sentido de se adaptar e adotar práticas que o conduzam a uma posição de liderança sustentável. O envolvimento com as instituições globais do setor e a integração de iniciativas voltadas à economia circular e à gestão de créditos de carbono são estratégias-chave que definirão a competitividade e a perenidade do setor em longo prazo.

2.2 ECONOMIA CIRCULAR E O SETOR DO AÇO

A Fundação Ellen MacArthur (MacArthur & Heading, 2019) conceitua a economia circular como uma alternativa atraente que busca redefinir a noção de crescimento, dissociando o desenvolvimento econômico do consumo de recursos naturais. A economia circular propõe substituir o descarte final de resíduos por redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, tornando a reciclagem uma peça-chave para alcançar essa eficiência. Ela proporciona soluções para materiais, aumentando sua vida útil e evitando o descarte, e é um exemplo de processo de reincorporação de materiais no ciclo produtivo.

A economia circular também recomenda um modelo de “criar e recriar/reutilizar e reaproveitar” recursos e produtos, e a Comissão Europeia (2015) já destacou esse objetivo em seu plano de ação. Ela busca melhorar os materiais, limitando o uso de recursos não renováveis e propondo uma grande circulação de resíduos e subprodutos mediante a reutilização, contribuindo para a sustentabilidade social, econômica e ambiental. Além disso, supera o âmbito e o foco estrito de ações, gestão de resíduos e reciclagem, tendo em vista uma ação mais ampla e eficiente na circulação de produtos, componentes e materiais nos ciclos técnicos e biológicos (Ashraf, Lodh, Pagone, & Castelluccio, 2023).

Haas, Krausmann, Wiedenhofer e Heinz (2015), que avaliou diversas definições e abrangências, como as de Allwood, Cullen e Milford (2010), Reck e Graedel (2012), consideraram a seguinte definição no estudo que avalia a quantificação dos fluxos e os estoques de materiais em um determinado sistema (*material flow accounting*), bem como seus impactos, sob a lente de análise de massas (*life cycle analysis*): a economia circular esforça-se por melhorar a eficiência da utilização dos recursos, fechando o ciclo e interrompendo os desperdícios. Essa é a definição mais alinhada com o escopo desta pesquisa.

Nesse sentido, a cadeia de produtos de aço é concebida para contemplar uma série de etapas que enaltecem os princípios da economia circular. O *design dos produtos* é planejado para facilitar a reciclagem e possibilitar o emprego de matérias-primas recicláveis. Na produção, são utilizadas tecnologias que respeitam o meio ambiente, além de métodos eficientes que diminuem o consumo de recursos e a formação de resíduos. Na etapa de uso, busca-se maximizar a vida útil dos produtos de aço e extrair o máximo de funcionalidade. Após o término do ciclo de vida útil, os produtos são recolhidos para serem reciclados, retornando ao ciclo produtivo como matéria-prima de novos itens de aço, ou até mesmo em outras formas, como componentes para reparos, refletindo a etapa de reutilização. Todas essas práticas são realizadas visando a redução do consumo de recursos naturais e do impacto ambiental em toda a cadeia

produtiva de produtos de aço, em consonância com os preceitos da economia circular (Bocken, Pauw, Bakker, & Van der Grinten, 2016; Branca et al., 2020; Morseletto, 2020).

Resumindo, estas são as estratégias de circularidade do aço (Bocken et al., 2016; Branca et al., 2020; Haas et al., 2015; Instituto Aço Brasil, 2023; WSA, 2023a):

- *Reduzir* significa diminuir a quantidade de material, energia, resíduos e outros recursos utilizados para criar o aço, e reduzir o peso do aço usado nos produtos.
- *Reutilizar* é usar um objeto ou material novamente, seja para seu propósito original, seja para um propósito semelhante, sem alterar significativamente a forma física do objeto ou material para um estado quase novo.
- *Remanufaturar* é o processo industrial padronizado de restaurar produtos usados que contêm aço.
- *Reciclar* é processar a sucata de aço de produtos no final de sua vida útil para criar novos aços. A reciclagem altera a forma física do objeto de aço para que uma nova aplicação possa ser criada a partir do material reciclado

A seguir, será apresentada a descrição das etapas da cadeia do aço e como se relacionam com as estratégias de circularidade.

2.2.1 Ciclo de produção do aço

Para fundamentar a compreensão das tendências da economia circular do setor do aço, é relevante entender as principais etapas de sua produção (Norgate, Jahanshahi, & Rankin, 2006; Van der Voet et al., 2013). Elas incluem:

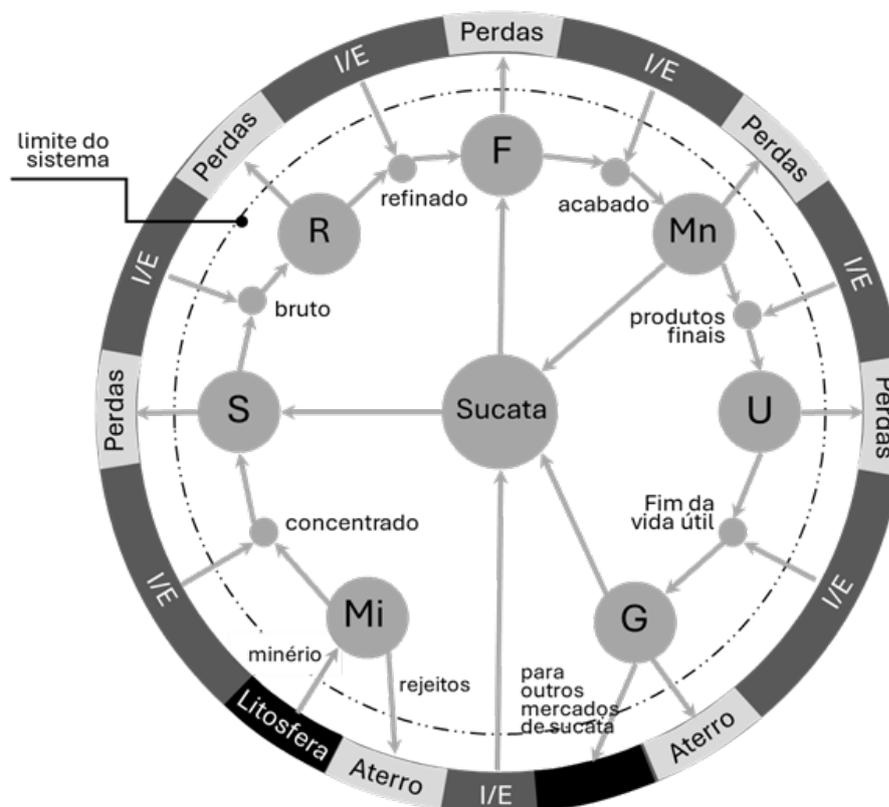
- *Extração de matérias-primas ou mineração*: a etapa inicial do ciclo de produção do aço envolve a extração de minérios de ferro, carvão e outros materiais necessários.
- *Redução do ferro*: o minério de ferro é processado para produzir ferro gusa. Devido à alta temperatura necessária (1400-1600 °C) e ao uso de carvão como fonte de energia, essa é a etapa mais intensiva em emissões de CO₂ em toda a cadeia de produção.
- *Produção do aço ou refino*: o ferro gusa é processado em altas temperaturas com a adição de outros elementos, como carbono, para produzir o aço. As altas temperaturas e o uso de energia também contribuem para as emissões de CO₂.

- *Processamento do aço ou fabricação*: o aço é transformado em diferentes formatos e tamanhos, como chapas, perfis, barras e tubos, dentre outros. A energia utilizada nessa etapa também contribui para as emissões de CO₂.
- *Manufatura de produtos*: o aço é utilizado nas indústrias como matéria-prima para a fabricação de produtos, por exemplo na construção civil, na indústria automobilística, em equipamentos etc.
- *Uso*: corresponde ao período em que o produto é utilizado para sua finalidade. Durante essa etapa, há um grande consumo de energia, gerando emissões de CO₂.
- Tendo em vista um ciclo fechado, o aço que compõe o produto é considerado como parte do estoque. O final desse período é o final de sua vida útil.
- *Gestão de resíduos e reciclagem*: no final de sua vida útil, os produtos derivados do aço, especialmente a sucata, podem ser descartados ou reciclados, voltando a fazer parte da cadeia.

A Figura 1, baseada no conceito de *Life Cycle Assessment* (LCA), ou Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)³, foi utilizada para facilitar o entendimento das etapas da cadeia do aço descritas anteriormente (Thomas & Birat, 2013). Com ela busca-se compreender os fluxos de materiais dentro e fora dos limites do sistema, especialmente no caso da sucata, que não segue um fluxo linear. A sucata se origina das etapas de manufatura e reciclagem, bem como de estratégias de economia circular de várias etapas do ciclo do aço. Durante os processos ocorrem perdas, que podem ou não ser recicladas. Além disso, é necessário movimentar os materiais e produtos em várias etapas, desde a mineração, passando pela utilização do consumidor final, até seu descarte nos mercados locais e/ou internacionais. O combustível utilizado pelos veículos durante as movimentações soma-se às emissões de CO₂.

³ Modelo desenvolvido para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto (Rebitzer & Hunkeler, 2003). Por não ser objeto da pesquisa, a discussão não se aprofundará neste conceito.

Figura 1 – Diagrama circular genérico para metais, com os principais processos



Fonte: Baseado em Reck, Müller, Rostkowski e Graedel (2008) e Li, Chertow, Guo, Johnson e Jiang (2020).
 Legenda: mineração/moagem (Mi), redução (S), refino (R), fabricação (F), manufatura de produtos que utilizam aço em sua composição (Mn), uso do produto final e parte do estoque de aço (U) e gestão e reciclagem de resíduos (G). Nota: Os processos estão ligados a outros mercados pela importação e exportação (I/E). As perdas acontecem nas etapas da cadeia.

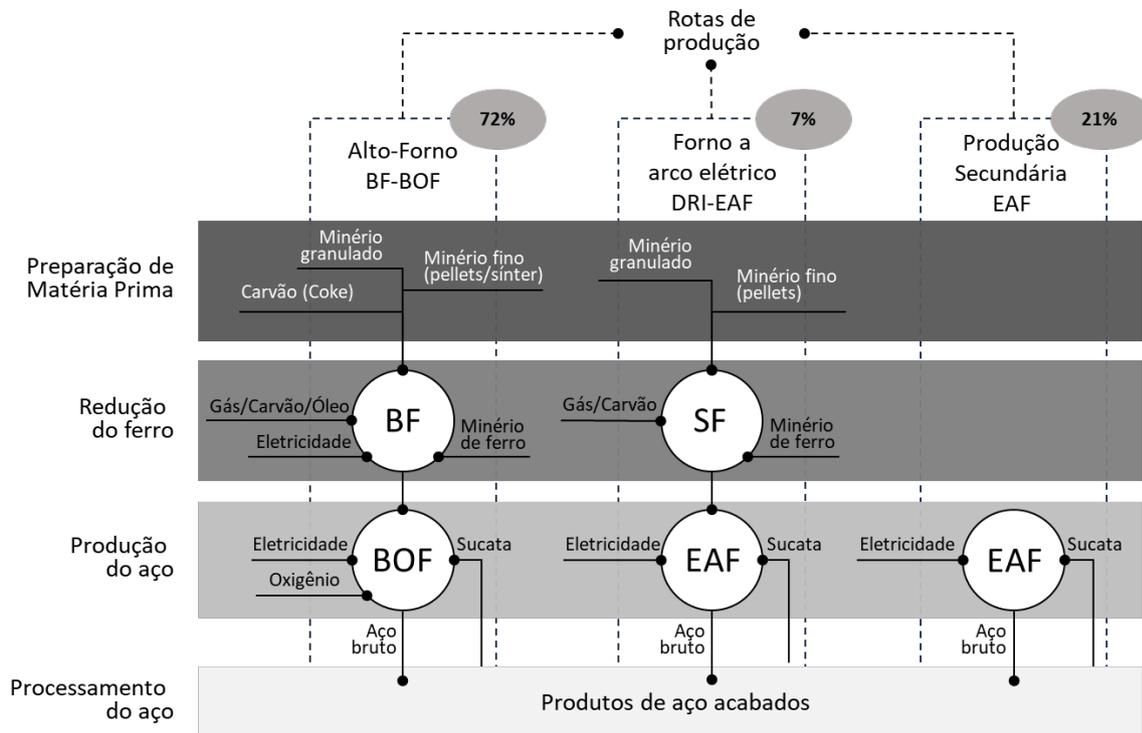
2.2.1.1 Rotas de produção de aço

Considerando os impactos das emissões na cadeia do aço, notadamente nas etapas de redução do ferro e refino do aço, destacar-se-ão as principais tecnologias existentes nesses processos e as contribuições para reduzir o consumo de energia e as emissões⁴.

As rotas de produção de aço se dividem em primária e secundária. A primária envolve alto-forno com oxigênio básico e rota direta do forno elétrico a arco de ferro reduzido, enquanto a rota secundária é a de fornos elétricos a arco. A Figura 2 apresenta as rotas de produção de aço e as principais tecnologias dessas etapas.

⁴ As emissões decorrentes do uso do produto durante sua vida útil serão discutidas mais adiante.

Figura 2 – Rotas de produção de aço e as principais tecnologias



Fonte: Lopez et al. (2022) e WSA (2023a)

Nota: BF (Blast Furnace): Alto-forno; SF (Shaft furnace): Forno de cuba vertical; DRI (Direct Reduced Iron): Redução direta; BOF (Based Oxygen Furnace): Forno de oxigênio básico; EAF (Eletric Arc Furnace): Forno a arco elétrico.

A rota de alto-forno representou, em 2023, 72% da produção global de aço (WSA, 2023a). O forno de oxigênio básico (BOF, *Basic Oxygen Furnace*) converte o ferro gusa do alto-forno (BF, *Blast Furnace*) e a sucata ferrosa em aço bruto. Durante o processo de conversão, o carbono e outras impurezas são reduzidos mediante injeção de jato de oxigênio sobre o ferro gusa, com geração de escória. Na Europa a produção de escória foi de 26% em relação a produção de aço (Eurofer, 2021). O alto-forno manterá sua posição principal na produção de ligas à base de ferro, sendo relevante para as usinas siderúrgicas integradas. Esforços consideráveis em tecnologias de recuperação de calor e gases podem representar a redução de emissões de 46 KgCO₂/t de produto, e 0,92 GJ/t de redução de combustível (Cavaliere, 2019).

A segunda rota primária representou em 2023 aproximadamente 7% da produção mundial de aço (WSA, 2023b). A redução direta (DRI, *Direct Reduced Iron*) é a redução de oxigênio do minério de ferro em seu estado sólido. Essa tecnologia abrange vários processos baseados em diferentes matérias-primas, reatores e agentes redutores, como o gás natural ou o carvão gaseificado. A produção de ferro reduzido diretamente está destinada a aumentar num futuro próximo, em decorrência das inovações contínuas das plantas, levando a um menor

consumo de energia e de emissões de CO₂. Nesse sentido, as soluções tecnológicas avançam em direção à recuperação de energia residual e ao uso de CO e H₂ como agentes redutores. O tamanho da planta está aumentando, a fim de se tornar semelhante à rota baseada em alto-forno BF. Além disso, miniusinas baseadas em reatores DRI normalmente são muito eficientes do ponto de vista energético (Cavaliere, 2019).

A rota secundária através de forno de arco elétrico (EAF, *Electric Arc Furnace*) representou aproximadamente 21% da produção total em 2023 (WSA, 2023). O EAF é a principal alternativa à rota BF-BOF. Nessa rota o aço é produzido apenas por meio da fusão de sucata. Sucatas, ferro reduzido diretamente, ferro gusa e aditivos são derretidos por meio de arcos elétricos de alta potência formados entre um cátodo e os ânodos. As graduações de sucata variam substancialmente em relação a sua composição química e geometria, portanto variam em seu preço. Materiais de alta qualidade levam a um consumo reduzido de energia e diminuem a quantidade de escória produzida. A rota EAF tornou-se cada vez mais competitiva em custos e qualidade em relação às siderúrgicas integradas, em razão de inovações de processos e tecnologia que reduziram significativamente o consumo de energia e aumentaram a produtividade. Durante a década de 1970, o consumo de energia era de aproximadamente 600 kWh/t-aço, mas os EAF altamente eficientes atuais consomem aproximadamente 300 kWh/t-aço (Cavaliere, 2019).

Comparativamente aos números mundiais de representatividade da rota primária BOF, o Brasil, em 2019, produziu aproximadamente 76%, contra 22,5% da rota secundária, dos fornos EAF, número em linha com a tipologia de produção dos países em desenvolvimento, enquanto no mesmo período os Estados Unidos produziram aproximadamente 30% na rota primária BOF, contra 70% da produção de aço da rota secundária de forno EAF. Para a comunidade europeia EU27, foram produzidos aproximadamente 57% na rota primária BOF versus 43% na rota secundária de EAF (Bataille, Stiebert & Li, 2021; WSA, 2021).

2.2.1.2 Sucata de aço

A reciclagem mediante o uso da sucata economiza CO₂ e energia, além de reduzir a dependência da extração de matérias-primas. Ao fechar o ciclo na cadeia de valor, a reciclagem impede o descarte em aterros e a incineração de matérias-primas críticas valiosas, o que pode ter um impacto prejudicial no meio ambiente e na saúde humana, como a poluição das águas. A reciclagem de metais economiza entre 60% e 95% da energia necessária para sua produção, em comparação com a mineração de novas matérias-primas. O uso de metais reciclados na nova

produção reduz a poluição do ar em 80%, a poluição da água em 76% e o uso de água em 40% (EuRIC, 2023).

As maiores reservas de minério de ferro estão localizadas em vários países ao redor do mundo, notadamente Austrália, Brasil, Rússia, China e Índia. Esses países são alguns dos principais protagonistas no mercado global de minério de ferro, tanto em termos de produção quanto de reservas.. Com relação à sucata, sua disponibilidade é limitada pela taxa de fim de vida dos produtos siderúrgicos e pela eficácia dos sistemas de coleta de sucata, sendo predominante nos Estados Unidos e China Aproximadamente 650 Mt de sucata são consumidos anualmente para produzir aço (em comparação com um volume total de produção de aço bruto de 1.869 Mt por ano) e quantidades similares são utilizadas nas rotas primária e secundária. Isso evita a emissão de aproximadamente 975 Mt de CO₂ anualmente e reduz significativamente o uso de outros recursos naturais, como minério de ferro, carvão e calcário. A World Steel Association estima que o setor de fundição global utiliza cerca de 70 Mt de sucata ferrosa a cada ano. Com um total de 720 Mt, a reciclagem de sucata ferrosa constitui a maior atividade de reciclagem do mundo (WSA, 2021).

A sucata tem origem no processo de produção de aço, na fabricação de produtos de aço e no pós-consumo. A sucata de casa é gerada internamente no processo de produção de aço, quando as siderúrgicas e fundições fabricam novos produtos. Essa forma de sucata raramente sai da área de produção de aço. Em vez disso, ela retorna ao forno no local e é derretida novamente. Avanços tecnológicos reduziram significativamente a geração de sucata de casa, que representa aproximadamente 29% do total de sucata. A sucata industrial é gerada em plantas de fabricação de produtos de aço e inclui itens como aparas, recortes e sobras de estampagem, quando uma parte é feita durante os processos de fabricação. Esse material é normalmente vendido para a indústria de metais de sucata, que o processa para a venda a siderúrgicas e fundições. Ele representa aproximadamente 23% do total de sucata de aço. Por último, a sucata pós-consumo resulta de produtos de aço industriais e de consumo (como automóveis, eletrodomésticos, edifícios, pontes, navios, latas, vagões de trem etc.) que terminaram de cumprir sua vida útil. A sucata velha ou pós-consumo representa aproximadamente 48% do total de sucata (Javaid & Essadigi, 2003).

As principais áreas de aplicação do aço e os percentuais de representatividade são: construção civil (51%), equipamentos (15%) e transportes (12%). O setor da construção civil é o principal usuário do aço, com tempos de vida de até cem anos, equipamentos com cinquenta anos e transporte com entre quinze e vinte anos de vida útil, o que impacta a disponibilidade de sucata (IEA, 2020).

O aço reciclado não é apenas uma matéria-prima de ferro indispensável para a indústria siderúrgica moderna, mas também a única matéria-prima sustentável capaz de substituir o minério de ferro em grande quantidade. A qualidade do aço reciclado afeta diretamente a qualidade do aço fundido, tornando necessário classificar e avaliar o aço reciclado antes que ele entre no forno. A maioria das empresas de ferro e aço utiliza pessoal de gerenciamento de qualidade para determinar a qualidade do aço reciclado, principalmente por meio inspeção visual e de medições de calibre (Xiao et al., 2023).

Segundo Andrade, Cunha e Gandra (2000), os Estados Unidos têm uma indústria sucateira bem desenvolvida e organizada, sendo os maiores consumidores e exportadores mundiais de sucata de aço. No entanto, no cenário brasileiro, a situação apresenta dinâmicas diferentes em razão de a produção de aço ser preponderantemente feita pela rota integrada. É importante observar que, apesar das dificuldades relacionadas à coleta e organização da indústria sucateira no Brasil, a demanda global por insumos metálicos para a produção de aço em fornos elétricos é grande, e a oferta de sucata é um fator determinante tanto regional quanto globalmente. Isso implica desafios e oportunidades para o Brasil na gestão da sucata como recurso valioso na cadeia produtiva do aço (Assunção, 2010).

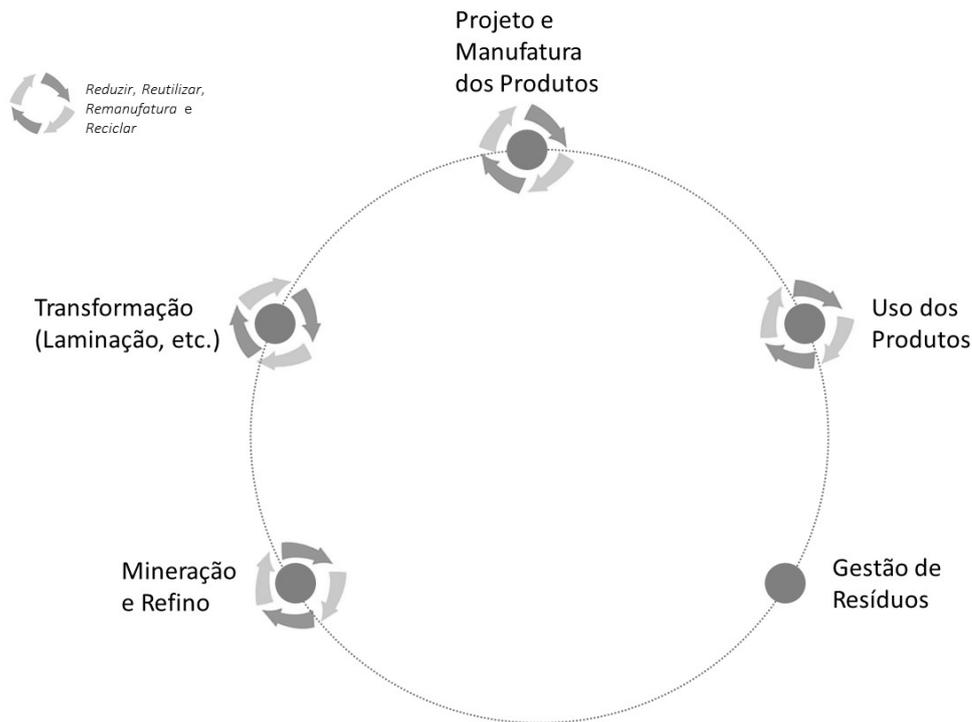
2.2.1.3 Simplificação das etapas da cadeia do aço

A Figura 3 apresenta o esquema simplificado das etapas da cadeia do aço agregada à circularidade. Ela ilustra as etapas do ciclo da cadeia do aço em: i) Mineração e refino; ii) Transformação; iii) Projeto e manufatura; iv) Uso dos produtos; e v) Gestão de resíduos. Os conceitos das estratégias de circularidade de *reduzir*, *reutilizar*, *remanufatura* e *reciclar* podem ser aplicados nas várias etapas do esquema simplificado utilizado.

As etapas de mineração e produção do ferro e do aço são extremamente complexas. Para fins de simplificação da discussão relacionada às tendências, desafios e boas práticas, essas etapas foram agrupadas em “mineração e refino”.

Para manter o foco nas atividades diretamente relacionadas aos produtos, não será aprofundada a discussão sobre o transporte e a distribuição, uma vez que o sistema logístico é extremamente dependente das condições de infraestrutura de cada país e que a cadeia do aço, como cliente desses serviços, exerce influência, mas não determina suas emissões.

Figura 3 – Esquema simplificado das etapas da cadeia do aço agregada à circularidade



Fonte: Baseada em Norgate et al. (2006) e Li et al. (2020).

As estratégias de circularidade do aço objetivam principalmente reduzir a utilização de recursos, como a energia, e mitigar as emissões. O setor siderúrgico é atualmente responsável por cerca de 8% da procura global de energia final e por 7% das emissões de CO₂ do setor energético (IEA, 2020).

A partir do estudo de Fărcean, Proștean e Socalici (2023), sobre indicadores de desenvolvimento sustentável do setor de aço, podem-se destacar aqueles mais relacionados com a economia circular:

- Emissões de CO₂: A redução de emissões de CO₂ está diretamente ligada à economia circular, pois medidas para diminuí-las frequentemente incluem práticas de reciclagem e a reutilização de materiais.
- Intensidade energética: A eficiência energética é um aspecto crucial na economia circular. O aproveitamento de energia de maneira mais eficaz muitas vezes envolve reciclar e reutilizar materiais, que consomem menos energia para serem produzidos do que novos materiais.
- Eficiência material: Esse indicador é particularmente relevante para a economia circular, visto que promove a utilização eficiente dos materiais e a incorporação de

resíduos no processo de produção, minimizando o desperdício e maximizando o uso de materiais.

- Sistema de gestão ambiental: Embora não seja mencionado especificamente em relação à economia circular, um sistema de gestão ambiental robusto pode facilitar a implementação de práticas circulares, como a gestão de resíduos e a redução do impacto ambiental.
- Investimento em novos processos e produtos: Ao investir em novas tecnologias e inovações, as empresas podem desenvolver processos e produtos que se alinham com os princípios da economia circular, como durabilidade, reciclabilidade e reutilização.

Esses indicadores avaliam a sustentabilidade das empresas do setor, incluindo práticas que contribuem para a implementação da economia circular, como o gerenciamento eficiente de recursos e a redução de resíduos.

2.2.2 Emissões e energia na cadeia do aço

O setor siderúrgico é o maior contribuinte industrial para as emissões de CO₂ e o segundo no consumo de energia. É responsável por 2,6 Gt de emissões de CO₂ anualmente e depende fortemente do carvão para obter energia, resultando em, 1,4 t de CO₂ de emissões diretas. O crescimento projetado da demanda e das emissões indicam uma demanda global de aço com aumento de mais de terço até 2050. Assim, sem medidas específicas para reduzir a procura e renovar a produção, espera-se que as emissões de CO₂ aumentem 7% até 2050 (IEA, 2020).

A produção do aço requer grande quantidade de energia em todas suas etapas, desde a mineração, passando pelas várias etapas de refino e transformação, até chegar aos produtos, impactando diretamente as emissões de GEE.

Na Tabela 2 são destacados o consumo de energia e a intensidade de emissões nas rotas primárias e secundárias. A relevância na representatividade do processo de alto forno BF-BOF na produção global de aço impacta o nível de consumo energético e consequentemente as emissões de CO₂ do setor.

Tabela 1 – Intensidade de energia e de emissões globais

Indicador	Rota Primária		Rota Secundária	Intensidade de Emissões e Energia Globais de CO2 2022
	Alto Forno BF-BOF	Forno a arco elétrico DRI-EAF	Forno a arco elétrico EAF	
Representatividade da rota na produção global (%)	72%	7%	21%	100%
Intensidade de Emissões Globais de CO2 (tCO2 por t de aço bruto fundido)	2,33	1,37	0,68	1,92
Intensidade de Energia Global (Gj por t de aço bruto fundido)	23,98	22,37	10,2	20,97

Fonte: Baseada em WAS (2023c) e IEA (2020).

Grande parte das emissões de CO₂ da cadeia de produção do aço estão associadas ao processo de produção de ferro. Tecnologias de produção de ferro com baixo teor de carbono, como a realizada a partir de minério de ferro, sucata e biomassa, podem ser utilizadas para reduzir as emissões de CO₂. Dessa forma, o setor siderúrgico pode se beneficiar da economia circular, reduzindo seus custos operacionais e impactos ambientais ao aumentar a reciclagem de aço e a utilização de fontes de energia renováveis. No caso do Brasil, com a matriz energética baseada em geração de energia a partir de hidroelétricas e biomassa, há um maior potencial de redução de emissões.

2.3 TENDÊNCIAS E DESAFIOS DO SETOR DO AÇO

O objetivo principal deste trabalho é mapear as tendências do setor de aço. Sua identificação, segundo Dragt (2017) e Rech (2016), serve como ferramenta para detectar, compreender e atuar sobre mudanças, ajudando a identificar caminhos potenciais e eventos futuros a partir de uma contextualização histórica da realidade. Essa prática, segundo Gomes, Cohen e Flores (2016), não busca gerar previsões exatas sobre o futuro, mas destacar a força de certos padrões e sua potencial estabilidade em um período próximo.

Rech e Maciel (2015) discorrem que os estudos de tendências permitem através de uma reflexão coletiva dos futuros desafios, estruturar e avaliar suas opções estratégicas e mercadológicas com vistas a orientar ações de interesses estratégicos nacionais, a geração de políticas tecnológicas em segmentos específicos, o desenvolvimento regional e de aglomerados produtivos. As principais tendências de futuro para a economia circular do setor do aço estão relacionadas à *adoção dos princípios de circularidade*, ao *fechamento do ciclo de economia*

circular, à *coordenação internacional* para compartilhamento de práticas e remoção de barreiras de comércio internacional (IEA, 2020; IRENA, 2023).

Segundo estudo da IRENA (2023), *Towards a Circular Steel Industry*, adotar os princípios de circularidade pode ajudar a fechar o ciclo no valor dos materiais de aço, reduzindo emissões de GEE. Alcançar um setor siderúrgico circular requer melhorar a eficiência dos materiais e dos processos, aumentar a reciclagem do aço e adotar fontes de energia renováveis na produção.

De acordo com Graedel, Reck, Ciacci e Passarini (2019), é necessário avaliar as repercussões ambientais da reciclagem internacional. O comércio internacional de materiais secundários e sua reciclagem em diferentes países pode levar a “vazamentos” na contabilidade de carbono, quando as ações de mitigação das mudanças climáticas são minadas devido a discrepâncias na eficiência dos processos e na intensidade das emissões de CO₂ entre diferentes países. Além disso, aponta-se para a importância de compreender profundamente todos os aspectos da economia circular, incluindo o papel das instituições e do comércio internacional, de modo a garantir que os objetivos da economia circular não comprometam os aspectos ambientais e econômicos da recuperação de recursos. Essas tendências destacam a complexidade de alcançar uma verdadeira circularidade para materiais como o aço, nos quais a localização da produção e do uso, bem como a eficiência do processamento e as políticas comerciais internacionais, desempenham papéis significativos.

Para mensurar a circularidade da cadeia do aço, Di Maio e Rem (2015) apontam a importância do uso do *Circular Economy Index* (CEI) um indicador robusto que promove a reciclagem e, por extensão, uma economia circular. O CEI destaca a relevância de conhecer detalhadamente os componentes e materiais dos produtos no fim de vida útil para maximizar seu valor na reciclagem. Em vez de focar apenas na massa do material reciclado, como é o caso das taxas de reciclagem convencionais, o CEI incentiva a separação de materiais de maior valor econômico e menor pegada de carbono.

A *inovação tecnológica* também é uma forte tendência para a circularidade do aço, sendo crucial para separar com eficiência os materiais de valor das outras matérias, como ilustrado pelo exemplo da separação de plásticos e alumínio de resíduos. Essas tecnologias permitem reciclar materiais que podem gerar mais receita, criar empregos e ter um impacto ambiental positivo, em contraste com a reciclagem de materiais menos valiosos, como o aço de baixa qualidade, que pode estar contaminado (Munaro, Tavares, & Bragança, 2020). Além disso, observa-se uma tendência em políticas e ciências para promover o uso de tecnologias eficientes em recursos, tanto para aumentar a segurança dos materiais e energia como para

minimizar o impacto ambiental. Isso se alinha com o crescente interesse em tecnologias verdes inovadoras, que representam um setor em expansão no campo da tecnologia sustentável (IEA, 2021; Munaro et al., 2020).

2.3.1 Mineração e refino

As principais tendências na etapa de mineração e refino estão relacionadas às tecnologias para mitigar emissões e utilizar matrizes renováveis verdes, por contemplarem os processos de redução do ferro e produção de aço. Na etapa de mineração, isso significa o reaproveitamento de recursos limitados de rejeitos do processo, como o próprio minério de ferro (Carmignano et al., 2021; Yuan, Zhang, Yin, & Li, 2021). Adicionalmente, na fase de refino, implica a otimização na utilização de sucata nas rotas primárias e secundárias.

A produção secundária de aço já utiliza em grande parte energias renováveis em fornos elétricos a arco, enquanto a produção primária, responsável por cerca de 70% da produção global de aço, ainda depende quase que exclusivamente de combustíveis fósseis (IRENA, 2023). O uso de *hidrogênio renovável* para a redução do minério de ferro é uma alternativa-chave que possibilita a produção de aço primário com quase zero emissão de carbono.

A *transição da siderurgia* para processos mais verdes é crucial para impulsionar os esforços globais de redução de emissões. Apesar disso, as tecnologias comerciais atuais de siderurgia, como os sistemas EAF e BF-BOF, ainda precisam de avanços tecnológicos significativos para atender às metas de redução de emissões. Embora a tecnologia EAF represente uma mudança nos processos siderúrgicos mais eletrificados e com menores emissões, ela enfrenta limitações, incluindo a falta de sucata suficiente, a necessidade de minério de ferro de alta qualidade e problemas de qualidade do produto, o que torna improvável que o EAF possa substituir totalmente a produção BF-BOF nos mercados globais (Carvalho, 2024).

Segundo Lopez et al. (2022), a transição para uma indústria siderúrgica *desfossilizada* exigirá uma demanda significativa por eletricidade renovável de baixo custo e a utilização de hidrogênio verde. Dentre as tecnologias viáveis para a mudança dos combustíveis fósseis para tecnologias baseadas na eletricidade destacam-se: redução direta de hidrogênio (H₂ DR), que propõe a utilização do hidrogênio como agente redutor, o que pode reduzir imediatamente as emissões de CO₂ em 35% em comparação com a rota tradicional BF-BOF; e eletrovimentação (EWIN), que tem potencial para eliminar as emissões de CO₂ em até 98%, mas ainda está em grande parte na sua fase de investigação, com possibilidade de estar disponível em escala industrial a partir de 2040.

A seguir são apresentadas algumas iniciativas em andamento, segundo Lopez et al. (2022):

- Oportunidades de *biomassa na siderurgia*: estudos de Mandova, Gale, Williams, Heyes e Miah destacam a avaliação global da adequação da biomassa para a produção de ferro e as possibilidades de redução das emissões de CO₂ utilizando biomassa em fábricas siderúrgicas integradas europeias.
- Produção e armazenamento de *hidrogênio*: estudos de Michalski et al., bem como a Posco Newsroom, fornecem informações sobre a geração de hidrogênio por eletrólise e armazenamento em cavernas de sal, além do estabelecimento da capacidade de produção de hidrogênio na transição energética alemã.
- *Inovação tecnológica* para a indústria siderúrgica: estudos de Morfeldt, Nijs, Silveira, Nuber, Eichberger e Rollinger examinam inovações tecnológicas e perspectivas futuras para a siderurgia elétrica moderna, bem como potenciais transições na indústria siderúrgica por intermédio da criação de mercados para produtos siderúrgicos verdes.
- Integração de *energias renováveis* na indústria siderúrgica: a pesquisa de Otto, Robinius, Grube, Schiebahn e Stolten investiga a redução das emissões de CO₂ por meio da integração de energia renovável e hidrogênio na indústria siderúrgica alemã.
- Potencial global de *amônia verde* e utilização de Captura e Utilização de Carbono (CCU, acrônimo de *Carbon Capture and Utilization*): baseada em usinas eólicas fotovoltaicas híbridas, o tema tem sido estudado, indicando perspectivas promissoras para a produção de energia sustentável.

O *roadmap* desenvolvido pela IEA (2020) identifica medidas para a otimização do desempenho tecnológico e para a eficiência de materiais, medidas que já podem ser adotadas para que se faça um uso mais eficiente da energia e do próprio aço na siderurgia. Elas incluem melhorias operacionais e a adoção de tecnologias de ponta disponíveis nas siderúrgicas, adicionalmente à economia de material ao longo das cadeias de valor, além de alcançar reduções imediatas de emissões, de melhorar o desempenho das siderúrgicas existentes e de preparar o cenário para reduções de longo prazo na demanda por aço. Com relação ao parque de ativos atuais, um plano deve ser estabelecido para lidar com as siderúrgicas existentes. Esse plano deve indicar uma redução na intensidade de CO₂ da produção requerida a apenas um ciclo de investimento de distância. Ao mesmo tempo, no curto prazo, é necessário um esforço

coordenado para planejar e construir uma nova infraestrutura de apoio para o hidrogênio, a geração de eletricidade de baixa emissão e o transporte e armazenamento de CO₂, de modo a se preparar para o rápido desdobramento de tecnologias siderúrgicas inovadoras após 2030.

O *roadmap* (IEA, 2020) sinaliza também que é necessário estabelecer desde cedo um sinal de *política claro e estável* para reduções de emissões a longo prazo, o que será um catalisador importante para decisões sobre infraestruturas existentes e novas. Projetos-piloto e de demonstração para tecnologias inovadoras de emissão quase zero ao longo da próxima década devem ser consistentes com as ambições de implantação pós-2030. Apoio financeiro do governo e coordenação serão críticos.

São desafios para o estudo da IEA (2020) as decisões de curto prazo com a cooperação entre as partes interessadas, tanto regional como internacionalmente, que definirão o caminho para o setor siderúrgico nas próximas décadas. Os governos e decisores devem ter objetivos firmes para 2030, como um marco crítico para estabelecer as bases para um setor de aço com emissão quase zero.

2.3.2 Transformação

As principais tendências na etapa de transformação estão relacionadas com a eficiência dos materiais para a desmaterialização, e com o desempenho tecnológico das etapas de ligas e produção de aço.

No contexto da economia circular, a *desmaterialização* refere-se à desvinculação do crescimento econômico do uso de materiais devido a melhorias na produtividade material, sendo proposta como uma estratégia central para a conservação de recursos e proteção ambiental (Cleveland & Ruth, 1998; Imperatives, 1987; Van der Voet et al., 2004). Paralelamente, as estratégias de aumento da eficiência de materiais para reduzir o consumo podem contribuir para o equilíbrio entre o crescimento na demanda global por aço e a extração mineral (IEA, 2020).

Seguindo princípio semelhante, as ligas especiais, como as ferroligas, proporcionam maior desempenho, maior durabilidade e menor uso de recursos, como no conceito “mesmo produto com menos aço” de Wang et al. (2021). Essas ligas também contribuem para o aumento da vida útil dos produtos produzidos com elas.

2.3.3 Projeto e manufatura de produtos

As principais tendências na etapa de projeto e manufatura de produtos estão relacionadas com o design dos produtos, com uma visão mais sistêmica de redução de demanda de aço pela eficiência de recursos e serviços, e com o aumento de vida útil dos produtos (IRENA, 2023).

A expansão do conjunto de materiais à disposição dos designers dificultou ainda mais o processo de reciclagem. Produtos tornaram-se mais funcionais e confiáveis, mas sua complexidade faz com que a reciclagem seja um desafio. Assim, de acordo com Reck e Graedel (2012), é necessário aprimorar o desenvolvimento e o projeto de produtos para facilitar a desmontagem, bem como outros critérios para potencializar a reciclagem, além de considerar o potencial reúso de aço no final da vida útil para outras aplicações com mínimo de processamento.

O conceito de redução de demanda de aço pela eficiência dos materiais (*desmaterialização*), “mesmo produto com menos aço”, de Wang et al. (2021), envolve a redução da quantidade de aço necessária para produzir uma unidade de uso final. Um exemplo nessa linha da indústria automobilística é a utilização de técnicas de “aligeiramento” (*lightweighting*), que otimizam os desenhos, juntamente com aço de alta resistência ou substitutos do aço para minimizar o peso dos veículos.

Repensar sistemicamente a economia circular, segundo Munaro et al. (2020), exige pensar estruturalmente e projetar soluções para negar externalidades negativas, ou seja, os danos não contabilizados no processo produtivo que afetam o meio ambiente e a sociedade.

2.3.4 Uso dos produtos

As principais tendências na etapa de uso dos produtos estão relacionadas com a extensão de sua vida útil, tecnologias para *reparar*, *reutilizar*, *requalificar* e *remanufaturar*, além da necessidade de leis, subsídios e incentivos para fomentar produtos remanufaturados.

Nessa etapa, Allwood et al. (2013) descrevem as estratégias de circularidade do aço identificadas como tendências pela IRENA (2023) e pela IEA (2020):

- Reutilização de aço: permite reutilizar com processamento mínimo o aço de produtos no fim de sua vida útil para outras aplicações. Essa estratégia utiliza uma quantidade insignificante de energia em comparação com a produção de aço primário e secundário, e pode desempenhar um papel importante em uma estratégia para melhorar a eficiência dos recursos.

- Eficiência de recursos: medidas que envolvem o fornecimento do mesmo serviço com menos aço.
- Eficiência econômica: medidas que podem tanto estender a vida útil de um produto de aço quanto ajudá-lo a fornecer mais serviços com a mesma quantidade de insumos materiais.
- Extensão da vida útil: a utilização de projetos que considerem a reparabilidade pode ajudar a prolongar a vida útil de um produto. Reparar partes levemente danificadas de produtos, especialmente produtos de consumo e veículos, pode estender significativamente sua vida útil.
- Uso mais intensivo: trata-se de medidas que envolvem mudanças comportamentais e, de preferência, para aumentar o serviço útil de produtos individuais de aço. Para o caso do setor de transportes, como os veículos de passeio, várias opções podem ser consideradas, por exemplo o compartilhamento de carros (mudança de carros pessoais para carros compartilhados) e as caronas (entre pessoas com destinos semelhantes). Uma mudança para modais de transporte público em vez de transporte privado também aumenta a taxa de utilização de produtos de aço. Para edifícios, a mudança para espaços de trabalho compartilhados ou o trabalho em casa, dentre outros, melhora a utilização da superfície construída, que é um fator-chave na demanda por aço.

Adicionalmente, destaca-se a importância de promover a implementação de práticas circulares no cenário da construção, setor que mais consome aço, mediante o projeto de sistemas circulares e materiais para estender o valor e a vida útil dos recursos, bem como a inclusão de critérios de decisão abrangentes no planejamento de projetos. Além disso, segundo Munaro et al. (2020), os desafios para a economia circular do aço na construção civil podem incluir o desenvolvimento de normas e regulamentos que favoreçam a reutilização e reciclagem de aço, a educação e a conscientização dos *stakeholders* sobre a importância dos ciclos fechados de valor e a integração de sistemas de decisão que considerem análises de ciclo de vida e a potencialidade de reutilização do material no fim da vida útil. Para as tendências, espera-se o desenvolvimento de materiais e sistemas de construção que permitam um ciclo de vida mais longo e uma revalorização do aço utilizado, bem como a promoção de um design que facilite a desmontagem, além da busca por inovações nas políticas de taxação do consumo e regulamentações que incentivem o uso de recursos regenerados.

2.3.5 Gestão de resíduos

As principais tendências na etapa de gestão de resíduos estão relacionadas com a eficiência da cadeia da reciclagem, tecnologias para maximizar o potencial da sucata, questões de comércio internacional e legislação para a cadeia da reciclagem.

Em linha com os objetivos de reduzir o consumo energia e as emissões do setor do aço, os conceitos relacionados à economia circular devem estar incorporados nas legislações, enfocando a prevenção de resíduos e a maximização do potencial de reciclagem do aço (IEA, 2020; IRENA, 2023).

Considerando o aumento do potencial da sucata no setor da construção civil, destaca-se a necessidade de uma abordagem coordenada na cadeia de suprimentos de construção, visando tratar as barreiras sistêmicas, que são identificadas como mais prementes do que as técnicas. Essas barreiras incluem a criação de uma base de dados de fornecedores e disponibilidade de seções reutilizadas, demonstração da demanda dos clientes, orientação técnica e educação para a indústria, além de uma liderança governamental forte, de estratégias de desmontagem e de critérios de aceitação para o uso de materiais secundários e resíduos (Munaro et al., 2020).

A desconstrução e a separação, bem como o tratamento, transporte e armazenamento de Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD) acarretam custos elevados. Os materiais/produtos reciclados/reutilizados têm preços elevados e carecem de esquemas de recompensa/penalidade para a gestão de resíduos (Munaro & Tavares, 2023).

Outra tendência de otimização de tecnologias de separação para favorecer a reciclagem na concepção dos produtos e reduzir as adições líquidas aos *stocks* pode aumentar a reciclagem de metais. Grandes acumulações de materiais em estoque de uso e elevadas taxas de crescimento dos estoques globais são barreiras para alcançar a circularidade. Os materiais utilizados para a geração de energia, especialmente os transportadores de energias fósseis, representam desafios para fechar o ciclo e reduzir o grau de circularidade (Graedel et al., 2019; Haas et al., 2015).

O desenvolvimento de tecnologias e medidas para aumentar a reciclabilidade é uma tendência para um melhor aproveitamento da sucata. Apesar de teoricamente os metais serem infinitamente recicláveis, sua reciclagem é muitas vezes ineficiente. Isso se deve às limitações impostas por comportamentos sociais, design de produtos, tecnologias de reciclagem e a termodinâmica da separação. Aumentar as taxas de coleta de produtos descartados e utilizar de modo mais eficiente metodologias de reciclagem modernas são ações necessárias para melhorar significativamente as taxas de reciclagem de metais. É preciso criar políticas internacionais para

minimizar a exportação de produtos complexos para países com instalações de reciclagem inadequadas e incentivar a coleta e reprocessamento eficiente de metais (IEA, 2020; Reck & Graedel, 2012).

A relevância do papel das instituições e comércio internacional foi estudada por Graedel et al. (2019), que concluem que é necessário mais refinamento no papel das instituições e do comércio internacional quando ao conceito de economia circular. Compromissos devem ser equilibrados com os esforços individuais das empresas por lucratividade e capacidade de produção. A economia circular deve ser concebida em nível global e se deve estar ciente das perdas que são inevitáveis em cada estágio de vida. Além disso, o manuseio de materiais e o transporte marítimo necessários para a circularidade precisam ser ponderados contra os potenciais impactos ambientais dessas atividades. O conceito de economia circular permanece um objetivo promissor, mas que não deve ser seguido de maneira acrítica, em detrimento de outros objetivos ambientais.

Quadro 1 – Matriz de tendências: estratégias × etapas do ciclo do aço

Estratégias	Mineração e Refino	Transformação	Projeto e Manufatura de Produtos	Uso dos Produtos	Gestão de Resíduos	Referências
Reduzir	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do uso de energia • Redução de resíduos e emissões • Transição da rota primária para matriz renovável • Inovações em tecnologias verdes • Uso de hidrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência dos materiais (desmaterialização) • Fontes de energia mais limpas • Desempenho tecnológico 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de demanda de aço em razão da eficiência dos materiais (desmaterialização) • Eficiência de recursos (mesmo serviço com menos aço) 			<ul style="list-style-type: none"> • IRENA (2023) • Carvalho (2024) • IEA (2020) • IEA (2023) • Lopez et al. (2022) • Wang et al. (2021) • Allwood et al. (2013) • Munaro et al. (2020) • Xiao et al. (2023)
Reutilizar	<ul style="list-style-type: none"> • Regeneração de rejeitos de minério de ferro 		<ul style="list-style-type: none"> • Estratégias para facilitar a desmontagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Estender vida útil dos produtos (melhor design para reparação/manutenção) • Tecnologias para reparar, reusar, requalificar e remanufaturar 		<ul style="list-style-type: none"> • IRENA (2023) • IEA (2020) • Lopez et al. (2022) • Wang et al. (2021) • Graedel et al. (2019) • Tingley, Cooper e Cullen (2017) • Carmignano, Vieira, Teixeira, Lameiras, Brandão e Lago (2021) • Yuan et al. (2021)
Remanufaturar			<ul style="list-style-type: none"> • Reúso de aço no final da vida útil para outras aplicações com mínimo processamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Leis, subsídios e incentivos para fomento de produtos remanufaturados 		<ul style="list-style-type: none"> • IRENA (2023) • IEA (2020) • Lopez et al. (2022) • Wang et al. (2021) • Munaro e Tavares (2023)
Reciclar	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de aço reciclado 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestão de perdas do processo 	<ul style="list-style-type: none"> • Design de produtos voltados à reciclagem 		<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologias para maximizar o potencial de sucata • Eficiência da cadeia da reciclagem • Legislação para a cadeia da reciclagem • Questões de comércio internacional 	<ul style="list-style-type: none"> • IRENA (2023) • IEA (2020) • Lopez et al. (2022) • Wang et al. (2021) • Reck e Graedel (2012) • Graedel et al. (2019) • Munaro e Tavares (2023) • Di Maio e Rem (2015)

Fonte: Elaborado pela autora.

3 METODOLOGIA

Para mapear as tendências para 2035 do setor do aço brasileiro, considerando o arcabouço da economia circular, esta pesquisa foi concebida como uma investigação qualitativa, que é adequada para compreender em profundidade as particularidades dos fenômenos, algo que seria limitado por métodos quantitativos (McNulty, Zattoni, & Douglas, 2013). Para a coleta de dados fluidos e detalhados foi escolhido o método de entrevistas em profundidade (Hoon & Baluch, 2020). A interpretação dos dados coletados foi realizada por meio da abordagem abdução (Cocchieri, 2008) e utilizou amostragem proposital (Spaulding et al., 2010), buscando identificar especialistas que atuam nas diversas etapas da cadeia do aço no Brasil.

Para adicionar solidez ao estudo, recorreu-se à combinação de dados secundários provenientes da literatura e estatísticas setoriais com dados primários obtidos por meio das entrevistas, permitindo assim uma triangulação de dados. Esse procedimento é considerado relevante em pesquisas exploratórias e explicativas, especialmente quando há incertezas sobre a precisão das informações fornecidas pelos entrevistados (Corley & Gioia, 2011).

3.1 POPULAÇÃO E SELEÇÃO DA AMOSTRA

Os participantes selecionados eram especialistas com notório saber em áreas de atuação que abrangem as diversas etapas da cadeia do aço no Brasil, conforme proposto na Figura 3. Eles foram convidados por meio de contatos pessoais e posteriores encaminhamentos de alguns dos especialistas que já haviam participado da pesquisa, e, portanto, foi utilizada a amostragem proposital (Spaulding et al., 2010).

O Quadro 2 apresenta o resumo das características definidas para os participantes do painel de especialistas entrevistados nesta pesquisa.

Quadro 2 – Resumo da caracterização definida para os participantes do painel de especialistas entrevistados

Etapas da cadeia do aço	Abrangência do Conhecimento		
	Técnico	Modelo de Negócio	Regulação
Mineração e Refino	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
Transformação	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
Projeto e Manufatura	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
Uso do Produto	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
Gestão de Resíduos	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>

Fonte: Elaborado pela autora.

Complementarmente, foram selecionados profissionais com:

- *Formação* compatível com sua área de atuação; para alguns temas a experiência prática se fez ainda mais relevante do que a acadêmica (ex.: gestão de resíduos).
- *Experiência mínima* de dez anos, para ter repertório sólido dos processos e da resolução de desafios.
- *Atuação nos setores* privado, acadêmico, em entidades setoriais e de regulação, para uma visão abrangente das dimensões relacionadas aos elos da cadeia.
- *Exposição internacional*, possibilitando discussões de *benchmark* e a exploração de tendências globais com possível impacto no Brasil.

Todas as participações foram totalmente voluntárias e o consentimento informado foi obtido previamente às entrevistas, quando foram indicados os objetivos da pesquisa, a metodologia, a confidencialidade e a sua autonomia para decidir não responder a qualquer questão ou desistir da investigação.

3.2 ELABORAÇÃO DA ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA

Inicialmente foram realizadas entrevistas em profundidade exploratórias com quatro entrevistados, de forma a validar o roteiro inicial e utilizando as técnicas de formulação de perguntas descritas por Payne (2014): clareza das perguntas; relevância para os objetivos do trabalho; e neutralidade – evitando respostas induzidas ou tendenciosas. Objetivou-se um questionário eficiente e a obtenção de dados de alta qualidade, que refletem com precisão as perspectivas e opiniões dos respondentes. O pré-teste foi realizado por intermédio de entrevistas exploratórias com quatro executivos de referência nacional e internacional em mineração, siderurgia, metalurgia, construção civil, indústria automobilística e economia do clima e sustentabilidade, entre agosto e setembro de 2023.

A partir das análises do pré-teste, as entrevistas foram estruturadas utilizando como roteiro as etapas da cadeia do aço apresentadas na Figura 1, concentrando-se em:

- Mapear as principais tendências para 2035 da economia circular para o setor do aço brasileiro.

- Identificar os desafios relacionados à economia circular apresentados pelos especialistas da cadeia do aço.
- Identificar as boas práticas relacionadas à economia circular apresentadas pelos especialistas do setor do aço no Brasil.

O roteiro das questões e dos temas norteadores da entrevista está no Anexo 1 assim como o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Anexo 2). As questões de pesquisa foram abertas para permitir flexibilidade ao explorar aspectos específicos relacionados ao ponto de vista de cada especialista. O Quadro 2 apresenta um resumo dos temas discutidos durante as partes das entrevistas.

Na primeira parte da entrevista buscou-se conhecer os entrevistados por meio de suas narrativas sobre a atuação na cadeia do aço. Na segunda, parte cada entrevistado apresentou sua percepção acerca do panorama da economia circular na cadeia do aço brasileira, considerando o momento atual, bem como as tendências observadas por eles para 2035.

Em seguida, na terceira parte ocorreu um aprofundamento no diálogo, visando explorar em detalhes as etapas descritas na Figura 1, relacionando as tendências para 2035 aos desafios do setor do aço no Brasil e, por fim, às boas práticas já implementadas no país.

A partir da análise progressiva do tema, a quarta parte da entrevista destinou-se a ouvir as opiniões dos especialistas quanto ao grau de relevância das dimensões i) técnicas, do ii) modelo de negócio e iii) da regulação para as macroetapas da cadeia do aço. O intuito era classificar a relevância de cada dimensão na superação dos desafios mapeados para que o setor esteja preparado para as tendências para 2035. Com base nessa análise, na quinta parte os especialistas foram convidados a priorizar as três ações que julgavam necessitarem com urgência de intervenção dos atores pertinentes. Para finalizar, na sexta parte a palavra foi franqueada aos especialistas para complementarem com algum outro tema que julgassem relevante para a pesquisa. O Quadro 3 compila a estrutura utilizada nas entrevistas com os especialistas.

Quadro 3 – Estrutura da entrevista com os especialistas

Parte 1	Apresentação dos entrevistados			
Parte 2	Panorama da economia circular no Brasil			
Parte 3	Aprofundamento nas macroetapas da cadeia do aço no Brasil			
	Macroetapas	Tendências	Desafios	Boas Práticas
	Mineração e Refino	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Ligas	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Manufatura de Produtos	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Uso	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Gestão de resíduos	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Outros	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
Parte 4	Classificação das dimensões com vistas a endereçar os desafios elencados			
	Macroetapas	Tecnologia	Modelo de Negócio	Regulação
	Mineração e Refino	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Ligas	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Manufatura de Produtos	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Uso	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Gestão de resíduos	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
	Outros	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
Parte 5	Priorização das três ações mais relevantes para endereçar os desafios elencados			
Parte 6	Abertura para incluir considerações finais dos entrevistados sobre aspectos relevantes ainda não abordados			

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram recolhidos por meio de entrevistas em profundidade com perguntas abertas, permitindo flexibilidade para explorar e encapsular o ponto de vista dos especialistas quanto aos aspectos relevantes para mapear as tendências para 2035 do setor do aço brasileiro, considerando o arcabouço da economia circular.

As entrevistas foram realizadas tanto por videoconferência como presencialmente, a depender da localização geográfica do entrevistado e de sua preferência pela forma de contato. Para evitar interrupções no fluxo da conversa, as entrevistas foram gravadas. Posteriormente, elas foram transcritas, e a identidade do entrevistado foi trocada por um código, conforme acordado nos termos de confidencialidade.

O processo ocorreu em duas etapas. A primeira etapa consistiu em entrevistas exploratórias com o intuito de validar e lapidar a estrutura da pesquisa discutida no item anterior. Após implementar os ajustes, a segunda etapa de entrevistas definitivas foi realizada entre outubro de 2023 e fevereiro de 2024.

A análise foi feita utilizando planilhas do Microsoft Excel e o Atlas TI. A captura dos padrões oriundos das respostas às perguntas abertas foi feita por meio da identificação de frases-

chave e conceitos, que foram agregados em temas, conforme o referencial escolhido. Assim, foi possível identificar os principais aspectos comuns e divergentes nas falas dos especialistas para tecer as generalizações, visando proteger a privacidade dos participantes.

3.4 MATRIZ DE AMARRAÇÃO

A representação da integração do modelo conceitual teórico com os objetivos, as questões de pesquisa e a metodologia é baseada na técnica chamada Matriz de Amarração, de Mazzon. Ela objetiva avaliar a coerência das relações estabelecidas e indicar a consistência metodológica da intervenção científica (Telles, 2001).

A matriz de amarração da pesquisa está representada na Quadro 4, no qual a primeira coluna contém o modelo conceitual teórico resumido, seguido dos objetivos específicos, das questões de pesquisa e das técnicas de análise relacionadas.

Quadro 4 – Matriz de amarração de Mazzon

**SETOR DO AÇO BRASILEIRO:
TENDÊNCIAS PARA 2035, DESAFIOS E BOAS PRÁTICAS DE SUSTENTABILIDADE**

Problema de Pesquisa	Objetivo Geral	Objetivos Específicos	Referencial Teórico	Métodos de Coleta de Dados	Métodos e Técnicas de Análise
Quais tendências da sustentabilidade terão impacto na competitividade do setor do aço brasileiro em 2035?	Mapear as tendências para 2035 para o setor do aço brasileiro, considerando o arcabouço da economia circular, a fim de identificar os desafios a serem endereçados, bem como mapear as melhores práticas para as empresas do setor.	Mapear as principais tendências para 2035 da economia circular para o setor do aço brasileiro.	Economia circular/sustentabilidade.	Pesquisa qualitativa por meio de entrevista estruturada em profundidade para elencar as principais tendências do setor. Pesquisa secundária.	Análise de conteúdo por meio da identificação de similaridades e peculiaridades relacionadas às etapas do setor do aço e às dimensões tecnológica, de modelo de negócio e regulação.
		Identificar os desafios relacionados à economia circular apresentados pelos especialistas da cadeia do aço.	Economia circular/sustentabilidade.	Pesquisa qualitativa por meio de entrevista estruturada em profundidade para elencar os principais desafios relacionados aos aspectos de tecnologia, modelo de negócio e regulação.	
		Identificar as boas práticas existentes relacionadas à economia circular no setor do aço no Brasil apresentadas pelos especialistas.	Economia circular/sustentabilidade.	Pesquisa qualitativa por meio de entrevista estruturada em profundidade para elencar os principais temas e ações.	

Fonte: Elaborado pela autora.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é realizada uma análise criteriosa dos resultados obtidos nas entrevistas conduzidas com especialistas que ocupam posições-chave nas diversas fases da cadeia produtiva do aço. Com essa investigação, busca-se discernir as principais tendências emergentes no setor siderúrgico brasileiro, com atenção às etapas que integram o ciclo da economia circular. Paralelamente, foram identificados os desafios mais significativos enfrentados pelo setor e proposta uma estratégia de priorização desses desafios, alinhada às tendências observadas. A partir dessas análises, foram sintetizadas de forma concisa as tendências e os desafios que demandam priorização, bem como as boas práticas sinalizadas pelos especialistas, o que permite oferecer uma visão mais abrangente e detalhada das expectativas para o futuro da indústria do aço no Brasil até 2035.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESPONDENTES DA PESQUISA

Os participantes selecionados são especialistas com notório saber em suas áreas, atuando necessariamente nas diversas etapas da cadeia do aço no Brasil e com visão abrangente das dimensões exploradas neste trabalho. O Quadro 3 apresenta o resumo da caracterização do painel de especialistas entrevistados na pesquisa. Uma breve biografia de cada entrevistado pode ser encontrada no Apêndice 2.

Como pode ser observado, o painel de entrevistados abrangeu completamente as etapas da cadeia do aço definidas neste estudo. Também é possível perceber que a formação dos especialistas está alinhada com os temas discutidos. Além disso, a maioria dos indivíduos tem experiência em diversas etapas, o que proporcionou reflexões abrangentes sobre as interfaces entre essas etapas e uma visão holística da cadeia. A presença de especialistas das cadeias que utilizam o aço como matéria-prima, como a construção civil (E7, E8 e E9), o setor automobilístico (E1, E7 e E5) e o de bens de consumo (E5), colaborou para agregar a visão do cliente na discussão do setor do aço. Assim, foi possível mapear as principais *tendências* e os principais *desafios* do setor, considerando o arcabouço da economia circular.

O tempo médio de atuação dos especialistas do painel é de 25 anos, denotando a experiência dos entrevistados. O Quadro 3 mostra que a maior parte dos entrevistados também esteve envolvida com a evolução da tecnologia, com o mercado e com a regulação dos temas relacionados à economia circular do aço no Brasil. Por essa razão, eles foram capazes de elencar os desafios já enfrentados e as *boas práticas* resultantes de sua superação.

A quase totalidade dos especialistas (exceto o E7) tem interação direta com o mercado global de seus setores de atuação. Dessa forma, eles puderam contribuir para a discussão comparativa entre a evolução e as tendências observadas nos mercados internacionais e sua relação com a trajetória de seus setores no Brasil. Essa característica tem especial importância durante as discussões relacionadas às *tendências* esperadas para nosso país no *horizonte de 2035*.

Quadro 5 – Resumo da caracterização do painel de especialistas entrevistados na pesquisa

Especialista	Formação	Tempo de Atuação (anos)	Posição atual	Setor	Abrangência do conhecimento							
					Etapas do Ciclo					Dimensões		
					Mineração e Refino	Transformação	Projeto e Manufatura	Uso	Gestão de resíduos	Técnico	Modelo de Negócio	Regulação
E1	Eng. Metalúrgica	>30	Dir. Executivo	Metalurgia / Automobilístico	x	x	x	x	x	x	x	x
E2	Eng. Metalúrgica	>30	Consultor Técnico	Metalurgia	x	x			x	x	x	x
E3	Eng. Metalúrgica	>30	Professor Titular	Academia					x	x	x	x
E4	Economista	>30	Gerente Geral	Gestão de Resíduos de Aço	x	x			x	x	x	x
E5	Eng. Metalúrgica	>20	Gerente de P&D	Automobilístico/ Bens de Consumo	x	x	x	x	x	x	x	x
E6	Eng. Mecânica	>40	Gerente Geral de Sustentabilidade	Siderurgia	x	x			x	x	x	x
E7	Eng. Ambiental	>12	Gerente de Sustentabilidade	Infraestrutura/ Automobilístico			x			x		x
E8	Eng. Civil	>25	Prof. Titular	Academia		x	x	x	x	x	x	x
E9	Eng. Civil	>20	Dir. Técnico	Associação de Classe			x	x	x	x	x	x
E10	Agronomia	>30	Diretor	Mercado de Carbono	x			x	x		x	x

Fonte: Elaborado pela autora.

O próximo tópico exporá as tendências identificadas mediante as análises realizadas nas entrevistas com especialistas do setor do aço, seguindo uma estrutura que foca as diferentes etapas da cadeia produtiva desse setor, conforme apresentado na Figura 3. Inicialmente, serão discutidas as principais tendências observadas que se relacionam a cada uma das etapas, desde a mineração e o refino até a gestão de resíduos, identificando as similaridades com o levantamento das tendências globais indicadas no Capítulo 2.

4.2 TENDÊNCIAS DO SETOR DO AÇO PARA 2035 NO BRASIL

Há um consenso entre os profissionais consultados: o conceito de economia circular não é apenas uma tendência passageira, e sim um paradigma que veio para remodelar permanentemente as práticas do setor siderúrgico. Essa mudança de direção deve-se, em grande parte, ao estabelecimento de metas ambiciosas para a neutralidade de emissões de carbono até 2050, juntamente com a implementação de mecanismos regulatórios, como a taxaço de carbono, dentre outros instrumentos de gestão ambiental.

A crise climática, caracterizada pelo alarmante fenômeno do aquecimento global, está promovendo uma mobilização sem precedentes da sociedade, e a conscientização ambiental está, por sua vez, exercendo pressão significativa sobre as empresas, especialmente aquelas inseridas em cadeias produtivas de grande impacto no meio ambiente, como as do setor da construção civil, a indústria automobilística, os fabricantes de equipamentos e os produtores de bens de consumo. Esses clientes corporativos demandam, agora mais do que nunca, que os fornecedores se comprometam com práticas sustentáveis e reduzam o impacto ambiental de suas operações para alcançar as metas de sustentabilidade globais acordadas.

Diante desse cenário, é imperativo que o setor siderúrgico brasileiro adote uma mentalidade estratégica voltada para o futuro, priorizando a inovação e a sustentabilidade para se adequar às novas expectativas do mercado e às exigências regulatórias, que são cada vez mais vigorosas. Isso envolve não apenas a adoção de tecnologias limpas e de processos de produção que tenham eficiência energética, mas também a integração de políticas corporativas que realcem a reciclagem e a reutilização de materiais como pilares para uma indústria do aço mais resiliente e economicamente viável em longo prazo.

Ao conversar com os especialistas sobre as etapas do ciclo do aço, eles apontaram as tendências, apresentadas a seguir.

4.2.1 Mineração e refino

As principais tendências no estágio de mineração e refino, conforme apontadas pelos especialistas, concentram-se na adoção de tecnologias orientadas para a *redução* de emissões e para o aumento de eficiência, especialmente nas rotas de produção de aço primárias e secundárias, etapas com maiores emissões na cadeia. Esse cenário é acompanhado pelo incentivo de políticas públicas que visam promover práticas mais sustentáveis.

O Entrevistado 1 aponta que o Brasil é extremamente rico em recursos minerais, especialmente quanto à produção de ferro, incluindo a abundância de minerais nas regiões Norte e Sudeste. Ele não vê problemas em relação à disponibilidade de minérios e acredita que o país está bem posicionado nesse aspecto. Embora a demanda global por minérios seja alta, o Brasil tem as reservas necessárias para atender a essa demanda.

No processo de mineração, evidencia-se a tendência de *reutilização* de recursos de rejeitos limitados, como o próprio minério de ferro, demonstrando uma conscientização crescente sobre a preservação de recursos naturais e a minimização do impacto ambiental, com o aproveitamento de materiais anteriormente considerados de menor valor (Entrevistado 1). Por exemplo, rejeitos de barragens desativadas, cujos rejeitos de vinte ou trinta anos atrás apresentam qualidade superior aos materiais prospectados atualmente. Isso implica um movimento em direção à otimização dos recursos existentes (Entrevistado 6). Grandes empresas do setor, como a Vale, estão comprometidas com a diminuição da pegada de carbono, o que significa realizar esforços para *reduzir* também o uso de combustíveis fósseis em sua logística, como nos trens e caminhões (Entrevistado 5).

Outra tendência de recuperação nessa etapa, segundo enfatizado pelo Entrevistado 8, é a existência de 10 a 15% de aço na escória de aciaria BOF e na escória de forno elétrico, apontando para uma oportunidade de aumentar a recuperação do aço, visando melhorar a circularidade.

Ademais, a transição para um cenário de baixa emissão de carbono é impulsionada pelo uso inovador de hidrogênio renovável na redução do minério de ferro, fornecendo um caminho viável para a produção de aço primário com emissões mínimas. Essa mudança é crucial não apenas para o avanço da siderurgia, mas também para apoiar os esforços globais que buscam mitigar alterações climáticas (Entrevistados 2, 5, 6 e 10). Além disso, a exclusividade do Brasil no uso do alto-forno a carvão vegetal, que é uma fonte renovável não fóssil, destaca o caminho da inovação sustentável que o país está seguindo (Entrevistados 5, 6, 7 e 10).

O uso intensivo da sucata é uma tendência mencionada pelo Entrevistado 6, indicando o emprego crescente de materiais *recicláveis* no processo de produção do aço, visando a sustentabilidade.

Considerando a estratégia de circularidade da *reciclagem*, aproximadamente 15% de sucata é utilizada na produção de aço, na rota primária, buscando diminuir a temperatura do forno. Além disso, uma tendência para a *redução* de emissões é o aumento desse patamar para 30%, mediante melhorias de tecnologia no processo (Entrevistados 1, 2 e 6). A rota secundária, que no Brasil representou 23% da produção de aço em 2019 (WSA, 2020), utiliza a energia elétrica e a sucata como principal fonte metálica. O Entrevistado 1 menciona que, até 2035, a tendência é de escassez de sucata, em razão da pouca organização da indústria de processamento e da reduzida oferta (Entrevistado 5), fruto do reduzido volume de coleta. Assim, segundo o entrevistado, para evitar a dependência de importações será necessário encontrar formas de estimular a geração e a circulação da sucata internamente no país.

Diversos entrevistados reforçaram o conceito de que a siderurgia de arco elétrico, ou siderurgia secundária, é apontada como uma siderurgia de reciclagem, indicando a tendência de que a reciclagem do aço deve se tornar cada vez mais proeminente (Entrevistados 1, 2, 3, 5, 6 e 8).

O Entrevistado 4, a seu turno, discute a importância da economia de escala e a relevância das alternativas de mercado, como a possibilidade de comprar ferroligas com maior facilidade em vez de depender exclusivamente de sucata, o que é considerado um negócio mais complexo e de alto custo. Dessa forma, observa-se que algumas usinas preferem importar aço e transformá-lo localmente, sinalizando uma tendência de *modelos de negócio* que favorecem a flexibilidade e a redução de custos operacionais em detrimento da circularidade (Entrevistado 4).

Em termos de inovação, há uma previsão de que a tecnologia, especificamente a inteligência artificial, será fundamental para avançar a economia circular. Isso pode envolver o desenvolvimento de novos processos – mais eficientes e com menos impacto ao meio ambiente – de produção e reciclagem de materiais de aço, tecnologia que seria aplicada para mensurar e consolidar os indicadores e de circularidade em toda a cadeia (Entrevistado 6).

No âmbito das políticas públicas, as tendências do setor do aço aplicadas a essa etapa estão relacionadas com a implementação de incentivos (financeiros e regulatórios) e a regulação de práticas sustentáveis do mercado de carbono para a cadeia do setor (Entrevistados 2, 8 e 9), de modo que as empresas adotem práticas de economia circular com maior eficácia e dedicação, especialmente considerando investimentos iniciais mais altos para tais mudanças (Entrevistado 2).

4.2.2 Transformação (ligas e laminação)

Os entrevistados concordam sobre a necessidade de um impulso que objetive processos mais sustentáveis de laminação, buscando diminuir o desperdício (*reduzir*) e aumentar a reciclagem de resíduos desse processo.

A tendência é investir em tecnologia que permita reaproveitar resíduos (*reciclar*) do processo produtivo do aço. Isso inclui utilizar carepa de laminação em plantas-piloto para produzir ferro gusa de forma mais sustentável, como o fez a Villares no passado e como hoje faz a Vale (Entrevistados 1 e 2).

Há uma ênfase perceptível em equipamentos de manuseio e transporte de última geração, indicando que a evolução tecnológica é uma tendência crescente. A menção a “megamáquinas” que transportam grandes volumes sugere um investimento contínuo em inovação tecnológica para aumentar a eficiência e a produtividade. Com a Usiminas descobrindo novas tecnologias de revestimento para proteção contra a oxidação, fica evidente o papel crucial da tecnologia em oferecer produtos de aço de melhor qualidade e com maior durabilidade (Entrevistado 4).

Há uma tendência de procura por aço de alta eficiência, que poderia estimular o setor a inovar e a produzir materiais que se enquadrem nessas expectativas. Existe uma carência da demanda, especialmente em aplicações da construção civil, assim como da indústria automobilística, como o desenvolvimento de novas tecnologias e novos tipos de aço, com o objetivo de reduzir o peso dos veículos e aumentar a segurança dos passageiros, além de se obter materiais de resistência mecânica elevada (Entrevistado 8).

Há uma necessidade de estimular a produção interna de sucata, devido à previsão de escassez desse insumo. Para evitar a dependência de importações, será essencial criar políticas ou estratégias que promovam a valorização e a circulação da sucata no mercado nacional (Entrevistado 5).

Futuramente, pode ocorrer um incremento na demanda por aço de melhor qualidade, que seja produzido de modo mais eficiente e com menor impacto ambiental, desde que haja uma precificação do carbono e uma previsão do aumento do custo do aço. Isso incentiva os clientes das siderúrgicas a buscarem melhorias em seus próprios processos (Entrevistado 8).

4.2.3 Projeto e manufatura de produtos

As principais tendências da economia circular no setor de aço no Brasil para 2035 se concentram na implementação de políticas públicas que incorporem a precificação do carbono,

gerando previsibilidade e incentivos para a adaptação à baixa emissão de carbono. Enfatiza-se que aço de melhor qualidade e maior eficiência energética são demandas que devem ser feitas pelos clientes das siderúrgicas, o que pressionaria o setor a avançar em termos de circularidade e sustentabilidade (Entrevistado 8).

Na etapa de manufatura, uma tendência esperada é o desenvolvimento de produtos que incorporem princípios da economia circular, como o design pensado para a reciclagem e a eficiência na utilização das matérias-primas, o que inclui a facilidade de desmontagem no final da vida útil (Entrevistados 1 e 2).

Outra tendência relevante é o projeto de manufatura de produtos, para que consumam menos matérias-primas e energia, entregando desempenho compatível ou superior para o fim a que se destina. Isso significa obter o mesmo desempenho com menor quantidade de recursos, ou seja, “*desmaterializar*”, o que sugere uma inclinação para uma manufatura mais eficiente e sustentável (Entrevistados 5 e 8).

No setor da construção civil, uma tendência que já começa a ganhar destaque e tem um forte apelo de sustentabilidade é a construção industrializada, associada ao reaproveitamento e à reciclagem. A ideia é que partes da construção sejam realizadas em ambiente fabril, otimizando o uso de recursos e minimizando a geração de resíduos (Entrevistados 8 e 9).

O Entrevistado 9 também menciona as tendências do uso de estruturas de aço que permitem *desmontagem* e reaproveitamento, contribuindo para a durabilidade e para uma redução na manutenção, além de seguir conceitos de otimização, desde os processos até a entrega final ao mercado.

No setor automobilístico, observa-se a tendência de projetar os veículos considerando a facilidade para a desmontagem no final da vida útil. Além disso, algumas montadoras que já incorporam essa tendência estão buscando mais alternativas inovadoras para reduzir a manutenção e otimizar as peças de reposição (Entrevistado 5).

Em se tratando de bens de consumo, como os da linha branca, foram observadas tendências divergentes. A primeira delas é a produção de produtos com maior vida útil, para evitar a necessidade de consumo maior de produtos (Entrevistado 2). A segunda visa renovar os bens de consumo de maneira mais rápida, com a incorporação de novas tecnologias mais eficientes, o que pode indicar também uma circulação mais rápida de materiais e maior geração de sucata no futuro, um aspecto importante para a economia circular (Entrevistado 5).

4.2.4 Uso dos produtos

Durante as entrevistas não foram identificadas tendências relevantes relacionadas à cadeia do aço quanto ao uso dos produtos, uma vez que essa utilização está relacionada às outras cadeias de produtos, como a da indústria da construção civil, dos equipamentos e a indústria automobilística.

De maneira geral, é importante mencionar que há uma forte inclinação para a implementação de práticas de reúso, por exemplo a porta de aço em construções, e remanufatura de peças do setor automotivo, evidenciando o potencial de circularidade e extensão do ciclo de vida dos produtos no setor do aço (Entrevistado 6). O ponto a ser considerado nessa etapa seriam as emissões decorrentes do uso dos produtos derivados do aço. Porém, não é objetivo desta pesquisa analisá-las.

4.2.5 Gestão de resíduos

As tendências do mercado do aço e sucata no Brasil são influenciadas por diversos fatores, tais como atividade econômica, demanda por produtos manufaturados, infraestrutura e políticas governamentais, dentre outros. O Brasil é um dos principais produtores e consumidores mundiais nesse mercado, cuja demanda está intimamente ligada à atividade econômica, que inclui setores como construção civil, indústria automotiva, eletrodomésticos etc. Um aumento na atividade econômica geralmente significa maior demanda (Entrevistado 4) pelo produto. A reciclagem de sucata desempenha um papel crucial nessa produção, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência da indústria siderúrgica. A disponibilidade e o preço da sucata podem ser influenciados por fatores como o consumo e o descarte de produtos de aço, bem como por políticas ambientais e de reciclagem (Entrevistados 1, 2 e 4).

De acordo com os Entrevistados 1 e 2, a tendência é que a demanda por sucata no Brasil continue a aumentar. Isso se deve ao esforço global em reduzir a pegada de carbono, o que incentiva o uso de sucata em detrimento de processos que geram mais emissões. Deve ocorrer uma pressão sobre o mercado de sucata brasileiro, especialmente quando se considera que a sucata no Brasil é relativamente barata em comparação com o restante do mundo. Outro ponto levantado pelo Entrevistado 2 é a capacidade das indústrias de equilibrarem o uso de sucata com o emprego de ferro gusa, em função da disponibilidade e do preço. Isso acontece para evitar flutuações extremas nos preços da sucata, que tendem a seguir as oscilações dos preços do ferro gusa.

A possibilidade de países superavitários em sucata, como os Estados Unidos, começarem a consumir mais internamente pode levar a uma elevação global dos preços, devido à menor disponibilidade para exportação. Na Europa, nos Estados Unidos, no Japão e, possivelmente, no Brasil, há uma tendência de preferência pelo uso de fornos elétricos a arco (que utilizam sucata como matéria-prima) em detrimento de grandes investimentos em rotas integradas que convertem minério de ferro em aço. Isso deve criar uma pressão adicional sobre o preço da sucata, tornando-a mais valiosa (Entrevistado 1).

Com relação à *qualidade da sucata*, fator que impacta a eficiência dos fornos de produção de aço, o Entrevistado 5 ressalta um potencial de melhoria no mercado interno, tendo em vista que o Brasil exporta sucata para países como Índia e China. Porém, sendo o custo de exportação mais alto, requer-se certo controle de qualidade, o que o leva a indicar que a sucata exportada é superior em qualidade àquela utilizada internamente.

Segundo o Entrevistado 4, uma tendência no mercado de sucata é o equilíbrio entre o mercado interno e as exportações, buscando evitar a escassez de sucata para a produção futura, algo que já ocorreu na década de 1980 devido ao aumento das exportações de aço, o que levou à exportação indireta da sucata. Outro ponto relevante é “*a prática de importação de aço com tarifas reduzidas da China e a preferência das grandes usinas por importar aço em vez de produzi-lo localmente*”, o que se configura como uma tendência preocupante, que pode ter implicações na produção de aço nacional e na geração de sucata no país (Entrevistado 4).

Além disso, de acordo com o Entrevistado 1, períodos de recessão podem levar a uma acumulação de sucata em razão da baixa demanda, que, no entanto, é seguida por períodos de alto consumo quando a economia melhora, criando um ciclo de altos e baixos que impacta os sucateiros e donos de indústrias siderúrgicas.

De acordo com o Entrevistado 5, outros fatores também afetam a disponibilidade e a precificação da sucata. Um excelente exemplo disso é a variação da vida útil dos diferentes tipos de aço utilizados em produtos variados. Materiais como pontes e obras de infraestrutura têm uma vida útil muito mais longa em comparação com automóveis ou eletrodomésticos. Isso significa que a taxa de entrada de sucata no mercado pode ser bastante diversa, a depender do tipo de produto, o que pode, por sua vez, influenciar a dinâmica de preços no mercado de sucata, assim como a obsolescência de produtos e a variedade de usos para tipos diferentes de sucata, sendo também são fatores que afetam a taxa de recuperação e, conseqüentemente, os preços.

Com a produção muito maior de aço hoje do que no passado, espera-se um volume superior de sucata disponível no futuro, o que pode favorecer a reciclagem por meio da rota secundária, contribuindo para o uso sustentável de recursos (Entrevistado 8).

Com relação ao modelo de negócio predominante dos sucateiros no Brasil, caracterizado majoritariamente por pequenas empresas, ele provavelmente não passará por grandes mudanças nos próximos dez a quinze anos. O Entrevistado 2 comenta que:

as usinas siderúrgicas preferem manter um cenário de sucateiros com força moderada, evitando a formação de “sucateiros industrializados”, pois isso iria conceder-lhes muito poder de mercado, como acontecesse nos Estados Unidos. Lá já existem diversas indústrias de sucata consolidadas, fortes e bem equipadas.

O Entrevistado 4 revela importantes tendências da economia circular no setor de aço no Brasil, tendências que poderiam ser proeminentes até 2035. Ele menciona

o avanço significativo e a profissionalização dos operadores de sucata, que começam a atuar como empresas, alinhados com as tecnologias e comunicações atuais, oferecendo um manejo de materiais mais avançado e consciente em relação às necessidades e regras das siderúrgicas. Também passa a acontecer a incorporação de práticas de saúde e segurança do trabalho, que vêm atreladas à formalização dos negócios.

Outra tendência será o aprimoramento de infraestruturas para coletar e processar sucata e resíduos de aço, para que possam ser reintroduzidos na cadeia produtiva (Entrevistado 1). Segundo o Entrevistado 1, os dois maiores consumidores de sucata desenvolveram as próprias estruturas de coleta e fornecimento. Isso mostra uma *tendência de autossuficiência* desses grandes *players* no que tange ao suprimento de matéria-prima, algo que foi considerado desnecessário no passado, quando o país era carente desse material, mas que continua a existir hoje, apesar de o Brasil ser agora um exportador de sucata, sinalizando que há oferta suficiente no mercado interno (Entrevistado 4).

Essas tendências indicam que o mercado de aço e sucata no Brasil é suscetível a mudanças globais e locais, especialmente em relação a questões ambientais e políticas. Há uma necessidade de adaptação às políticas de sustentabilidade e de preparação para possíveis impactos futuros nos preços e na demanda por aço e sucata. Isso sugere que as empresas do setor precisam considerar ativamente a gestão de resíduos e o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para se manterem competitivas (Entrevistados 6 e 9).

Já existe, atualmente, uma prática de mineração urbana,⁵ com a separação específica de materiais para obtenção de melhores preços e o redirecionamento de determinados materiais

⁵ A mineração urbana é aplicada à recuperação de matéria-prima secundária a partir de resíduos sob o conceito 3R, o que significa *reduzir, reutilizar e reciclar*. A principal premissa é que materiais valiosos podem ser recuperados de resíduos em uma mineração análoga, para produzir matéria-prima secundária de alto valor e sustentável, para que os produtos industriais possam ser fornecidos com custos mais baixos (Cossu & Williams, 2015; Xavier, Giese, Ribeiro-Duthie, & Lins, 2021).

diretamente para setores específicos, sem que se passe pelo setor da sucata. Isso indica que a tendência é uma especialização na reciclagem e na recuperação de materiais de valor a partir de bens obsoletos ou descartados (Entrevistado 4).

As políticas públicas que promovem a economia circular podem aumentar a disponibilidade de sucata, “fazendo-a brotar na terra” assim que começarem a procurar por ela ativamente. Isso sugere que mudanças políticas podem influenciar a dinâmica de preços ao alterar a oferta de sucata no mercado (Entrevistado 6).

Os Entrevistados 5 e 9 apontam para a *questão social* do ciclo de gestão de resíduos, haja vista que existe uma ampla rede de coleta de sucata de aço, que se inicia com catadores em bairros mais humildes, que vendem a sucata a preços baixos para os sucateiros. Esses sucateiros, por sua vez, operam com margens bem apertadas, sugerindo um mercado em que o preço é altamente sensível e determinado em grande parte pela siderurgia. O Entrevistado 9 ressalta que tanto a coleta de sucata como a dependência de muitas famílias dessa atividade são “*fruto de um baixo desenvolvimento social*” e da “*falta de incentivo por políticas públicas adequadas*”.

Essas tendências indicam que o mercado de aço e sucata no Brasil está suscetível a mudanças globais e locais, especialmente em relação a questões ambientais e políticas. Há uma necessidade de adaptação às políticas de sustentabilidade e de preparação para possíveis impactos futuros nos preços e na demanda por aço e sucata. Isso indica que “*as empresas do setor precisam considerar ativamente a gestão de resíduos e o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para se manterem competitivas*”, conforme salienta o Entrevistado 8.

Nesse sentido, a regulação desempenha um papel vital, principalmente no que diz respeito à reciclagem de veículos. O Entrevistado 1 reforça essa tendência ao citar que “*a agilização na definição da propriedade de veículos recolhidos pelo Detran⁶ poderia potencializar a reciclagem automotiva, tornando-a tão eficaz quanto em países como os Estados Unidos*”.

Como se pode perceber em razão da efusiva manifestação dos entrevistados, a gestão de resíduos é um dos temas mais relevantes para a evolução da economia circular do aço, cujo desenvolvimento exerce papel relevante na tendência de ampliação da reciclagem no setor do aço no Brasil e no mundo.

⁶ Departamentos Estadual de Trânsito, órgãos do Poder Executivo estadual que fiscalizam no território brasileiro o trânsito de veículos terrestres em suas respectivas jurisdições. Dentre suas atribuições estão a determinação das normas para formação e fiscalização de condutores.

4.2.6 Comparação entre tendências apontadas pelos entrevistados e tendências globais

Para avaliar o estágio de evolução do mercado brasileiro em relação ao mercado global, foram comparadas as tendências observadas no referencial teórico para a cadeia do aço e as opiniões do painel de especialistas entrevistados. A seguir são apresentadas as principais conclusões dessa análise comparativa.

A tendência global de busca da *neutralidade de carbono* e as *práticas de economia circular* no setor siderúrgico ecoam na realidade brasileira por meio de várias etapas do ciclo do aço. Na etapa de *mineração e refino*, a ênfase recai sobre a adoção de tecnologias de redução de emissões, eficiência e reutilização de recursos, como o uso do hidrogênio renovável e do carvão vegetal não fóssil no Brasil. Esses aspectos podem ser igualmente relacionados às tendências globais de combate à crise climática.

Na etapa de *transformação*, há um movimento em direção ao reaproveitamento de resíduos e à evolução tecnológica, buscando reduzir o consumo de recursos, movimento esse que pode ser observado globalmente, visto que diversos países procuram soluções tecnológicas que englobem também a circularidade em seus objetivos.

Na etapa de *projeto e manufatura*, percebe-se um foco no design para reciclagem e otimização de recursos, visando melhorar o desempenho dos produtos com a utilização de cada vez menos material (desmaterialização). No caso específico da construção civil, diversas soluções de industrialização passam pelo emprego de aços engenheirados que possibilitam implementar os conceitos da economia circular de forma abrangente. Essa etapa mostra que o Brasil está em linha com a mudança global em direção a práticas de produção mais eficientes e sustentáveis.

O *uso dos produtos* destaca práticas de reuso e remanufatura que fazem parte de uma abordagem crescente de extensão da vida útil dos produtos em escala global, bem como no mercado brasileiro.

Quanto à *gestão de resíduos*, no Brasil, as tendências incluem o aumento na demanda por sucata e o desenvolvimento de infraestruturas para coletar e processar resíduos, alinhadas com as diretrizes globais de redução da pegada de carbono.

As questões de *legislação* no Brasil, como a taxação do carbono e a regulamentação de práticas sustentáveis, espelham as regulamentações internacionais que buscam incentivar mudanças na indústria em vista de práticas mais sustentáveis.

Em resumo, observa-se que o Brasil está *alinhado* com as tendências globais de sustentabilidade no setor do aço, com um foco claro na i) economia circular, ii) na redução de emissões e na iii) inovação tecnológica para materializar esses conceitos.

Complementarmente, observa-se a relevância das questões regulatórias e de mercado, nacional e internacionalmente, na velocidade e na urgência das tendências. Há um alinhamento considerável entre ambas, especialmente no que tange à sustentabilidade e à economia circular.

Contudo, notaram-se divergências entre as tendências apontadas pelos especialistas para o Brasil e as coletadas no referencial teórico sobre o mercado global. A seguir são apresentadas algumas especificidades das duas visões.

Em nível global, nota-se uma forte ênfase em:

- Projetos-piloto para tecnologias de emissão quase zero e o apoio financeiro do governo como elementos cruciais.
- Importância do curto prazo e da cooperação regional e internacional ao definir o caminho para a indústria siderúrgica.
- A desmaterialização é destacada como uma estratégia central para a preservação de recursos e a proteção ambiental.
- Promoção do design para facilitar a desmontagem e o estímulo a inovações nas políticas de taxa de consumo e regulamentações que encorajem o uso de recursos regenerados.
- Na gestão de resíduos, foca-se a eficiência da cadeia da reciclagem, a tecnologia para otimização do potencial da sucata, o comércio internacional e a legislação voltada à economia circular.

No caso do Brasil, destacam-se as seguintes peculiaridades:

- A adoção de tecnologias para reduzir emissões na mineração e no refino, com ênfase na utilização de recursos de rejeitos limitados, como o próprio minério de ferro.
- Uso de hidrogênio renovável na redução do minério de ferro e do alto-forno a carvão vegetal não fóssil como alternativas para produzir aço primário com emissões mínimas, o que, porém, está num estágio de desenvolvimento mais tímido no Brasil.
- A escassez de sucata no mercado interno do Brasil é uma preocupação, o que pode divergir da tendência global, que sugere um aumento do potencial da sucata.

- As tendências do mercado brasileiro apontam para uma necessidade de políticas públicas mais efetivas para fomentar a economia circular, o que pode refletir uma discrepância nas abordagens regulatórias em comparação com a ênfase global em políticas de taxa de consumo e regulações para uso de recursos regenerados.

As *divergências* identificadas parecem residir principalmente no fato de que o Brasil enfrenta desafios específicos, como a escassez de sucata e a necessidade de políticas públicas mais atuantes para fomentar práticas sustentáveis. Por sua vez, globalmente, a tendência é consolidar projetos de emissões zero, coordenação internacional para inovação e políticas regulatórias sustentáveis. Isto posto, nota-se que as divergências não são muito marcantes e que podem antes representar diferenças em estágios de implementação e desafios locais do que oposições diretas às tendências globais.

4.3 DESAFIOS

Esta pesquisa abrange uma avaliação de vertentes tecnológicas, modelos de negócios e questões regulatórias que impactam cada parte da cadeia produtiva e a indústria siderúrgica como um todo.

Os desafios do setor são amplamente reconhecidos, e a indústria busca estratégias para superá-los, integrando considerações ambientais, econômicas e sociais. Priorizar esses desafios é crucial para uma transição eficiente e para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis, que já começam a ser mapeadas por intermédio de diferentes abordagens e tecnologias.

A percepção dos entrevistados é de que tecnologia, modelos de negócios e regulação são elementos fundamentais que devem ser enfrentados pelo setor do aço para que se alcance uma gestão de resíduos eficiente dentro dos princípios da economia circular. A competitividade e os incentivos governamentais são fatores externos que também exercem grande influência no desenvolvimento sustentável do setor.

4.3.1 Tecnologia

A tecnologia é vista como um desafio-chave entre os entrevistados, uma vez que a indústria precisa desenvolver tecnologias menos agressivas ao meio ambiente. Reconhece-se a necessidade de inovação e fomento à pesquisa para que haja sustentabilidade no processo produtivo.

Tecnologias de ruptura que ainda não estão totalmente desenvolvidas ou disponíveis em larga escala e com custos compatíveis com os atuais são essenciais para que se atinja o objetivo de carbono neutro até 2050, conforme ressalta o Entrevistado 6.

Um dos desafios de tecnologia mais relevante está relacionado com a melhoria energética nas fases de refino e de transformação, nas quais há os maiores níveis de consumo energético e emissões de carbono. Nesse sentido, existem globalmente várias iniciativas, por exemplo a utilização de hidrogênio verde. Todavia, o desenvolvimento da cadeia e a viabilidade econômica em escalas reduzidas são desafios consideráveis (Entrevistado 6).

O Entrevistado 1 enfatiza a eficiência logística das mineradoras brasileiras como um ponto de destaque para a sustentabilidade. A capacidade de transportar o minério de forma eficiente, seja por vias ferroviárias, seja por vias marítimas, não só permite a competitividade no mercado internacional, mas também reduz o consumo de recursos, alinhando-se aos princípios da economia circular.

As tecnologias para reaproveitar minério de ferro de rejeitos são mais um desafio que exige revisão e melhoria nos processos de mineração e refino, de modo a se adaptar a esses materiais (Entrevistado 6). O mesmo vale para o desenvolvimento de tecnologia que vise aumentar a proporção de sucata usada pelas grandes siderúrgicas no processo de fabricação do aço. O Entrevistado 1 citou empresas que planejam dobrar a utilização de sucata em seus processos, mirando uma participação de pelo menos 20%, para reduzir a necessidade de gusa líquido e, conseqüentemente, diminuir a emissão de carbono.

Para os Entrevistados 6 e 9, a digitalização e a implementação de tecnologias de inteligência artificial são grandes temas em pauta no setor, representando um desafio para a modernização e a eficiência operacional da indústria do aço.

A falta de estímulos para inovação é um desafio citado pelo Entrevistado 8, uma vez que, sem a pressão para que o aço se torne mais caro devido a regulamentações de carbono, não há incentivo suficiente para os clientes e usuários do aço melhorarem seus processos e buscarem soluções mais eficientes.

Em suma, a necessidade de investimento em novas tecnologias e inovação como as descritas pelo Entrevistado 5 é limitada pelo excesso de capacidade ociosa. Ele menciona que, na siderurgia, há uma capacidade ociosa que vai de 30 a 40% , o que desencoraja novos investimentos no setor, já que não é economicamente atraente investir num mercado como tal. Mesmo com a presença de tecnologias exclusivas, como o alto-forno a carvão vegetal, e novas tecnologias emergentes, como a redução direta de ferro usando hidrogênio, o setor enfrenta

desafios para integrar e investir em tecnologia em um cenário político, ambiental e legal restritivo.

4.3.2 Modelos de negócios

A interligação do mercado siderúrgico brasileiro com o cenário global destaca o desafio de navegar por um ambiente complexo, exigindo adaptações constantes para que se garanta competitividade e a sustentabilidade no contexto internacional. Os desafios do cenário externo têm implicações significativas e exigem um olhar estratégico sobre a posição do Brasil no mercado mundial de aço.

Diante de dificuldades específicas, como o conhecido “custo Brasil”, que engloba a complexidade tributária e burocrática, e a concorrência acirrada, principalmente advinda dos produtores de aço chineses, o Brasil busca afirmar sua posição competitiva, uma preocupação evidenciada pelo Entrevistado 2.

O Entrevistado 4 chama a atenção para a tendência de grandes usinas siderúrgicas preferirem importar aço em vez de fortalecer a produção doméstica, sublinhando os possíveis prejuízos dessa prática para a indústria nacional. Essa escolha estratégica revela a tensão entre produzir e importar, crucial para determinar as direções futuras da competitividade da indústria brasileira.

A questão sobre como os modelos de negócio se adaptarão à gestão da sucata é um desafio importante. Existe uma consideração sobre a continuidade dos sucateiros ou sobre a possibilidades de as próprias siderúrgicas começarem a investir para comprar diretamente a sucata, indicando mudanças possíveis na estrutura da cadeia de suprimentos do setor (Entrevistado 2).

A siderurgia secundária enfrenta o desafio da dependência do preço da sucata e do custo da energia elétrica, fatores essenciais para a produção de aço a partir de materiais reciclados (Entrevistado 5), além de sua disponibilidade, de acordo com o Entrevistado 4, sendo a oferta de sucata escassa, o que se torna um problema para a indústria, já que a reciclagem de sucata é essencial para a produção sustentável de aço.

Embora exista uma clara consciência dos benefícios da economia circular, ainda há vários obstáculos que precisam ser superados para que as práticas sustentáveis sejam efetivamente integradas e se tornem a norma no setor do aço no Brasil (Entrevistado 1).

O Entrevistado 2 sugere que, mais do que incentivos governamentais, a consciência do consumidor (industrial e final) e a pressão por práticas sustentáveis podem ser forças mais poderosas para direcionar o setor para a sustentabilidade.

O Entrevistado 6, a seu turno, destaca o desafio relacionado à dificuldade de implementar práticas de sustentabilidade, já que estas poderiam aumentar os custos de produção. Há uma resistência do mercado em pagar mais pelo aço, mesmo que seja com uma pegada de carbono baixa ou neutra.

Existe uma carência de demanda, especialmente da indústria automobilística, assim como na construção civil, por aços de alta eficiência, o que poderia estimular o setor a inovar e a produzir materiais que se enquadrem nessas expectativas (Entrevistado 8).

O setor tem enfrentado desafios para manter práticas sustentáveis. Um exemplo disso é a regressão na prática de corte e dobra do aço. A terceirização dessa etapa tinha contribuído para mitigar o desperdício em obra, mas, por questões de custo e articulações de mercado, como a criação de cooperativas para comprar e importar aço, houve um movimento de retorno ao corte e dobra em obra, o que, segundo o Entrevistado 9, representa um revés para os esforços de sustentabilidade.

Este panorama mostra a necessidade de se criar uma estratégia equilibrada de proteção e abertura de mercado, adaptabilidade regulatória e impulso à inovação, para que a siderurgia brasileira possa prosperar em um mercado global cada vez mais integrado e competitivo.

4.3.3 Regulação

A transição do setor siderúrgico para operações com emissão zero é um desafio relevante, especialmente devido à alta intensidade de uso de carbono inerente ao setor, o que exige esforços coordenados e investimentos públicos e privados significativos para a transformação desejada (Entrevistado 5).

O maior desafio, nesse aspecto, é a falta de políticas públicas com previsibilidade e de incentivos claros, como a precificação do carbono. Sem uma política efetiva nesse sentido, torna-se difícil motivar a indústria a migrar para uma economia de baixo uso de carbono (Entrevistado 8). Além disso, as empresas tenderão a resistir à implementação de práticas sustentáveis que possam comprometer a lucratividade, caso não exista uma precificação de carbono que justifique economicamente tais ações (Entrevistados 5 e 6).

Desse modo, a falta de estímulos para a inovação sustentável é problemática. Sem a pressão regulatória para encarecer o aço por intermédio de mecanismos como a taxaço de

carbono, não há motivação suficiente para inovações que levem a processos e soluções mais eficientes. Isso é confirmado pela percepção de que as empresas aguardam ações governamentais concretas para implementarem políticas de baixo carbono, sem as quais permanecem imóveis, à espera de diretrizes claras para agirem (Entrevistado 8).

O Entrevistado 1 traz para a discussão o problema advindo da regulação inadequada, destacando o papel ativo das empresas e associações na remodelação de legislações favoráveis à economia circular, como a reciclagem de automóveis apreendidos. Uma legislação eficiente é necessária para garantir equilíbrio entre práticas sustentáveis e competição justa entre empresas do mesmo território.

No cenário de mercado, a indústria enfrenta volatilidade, com empresas do setor siderúrgico lidando com desafios oriundos de investimentos em segmentos de mercado que não prosperaram, somados à competição com a importação de aço mais barato de países como a China (Entrevistado 1). A regulamentação é essencial e um desafio em si, pois, enquanto buscam proteger a indústria nacional, as empresas também podem restringir sua eficácia em um mercado global competitivo (Entrevistado 4).

Além disso, eventos internacionais impactam o mercado brasileiro, como ilustrado pelo caso de uma empresa de aço que aproveitou um estaleiro em Porto Alegre para desmontar navios velhos durante uma escassez de sucata na China, o que mostra a influência externa na indústria local (Entrevistado 8).

O conceito de créditos de carbono surge como uma eventual solução, embora ainda encontre resistência por causa da falta de confiança no sistema. Projetos como o Bio Carbono, que atua com a produção de carvão vegetal a partir de florestas plantadas, apontam para uma direção em que a produção de carvão vegetal e a fixação de carbono no solo possam gerar créditos de carbono, apresentando um caminho para o futuro do setor (Entrevistado 6).

Assim, o alinhamento com políticas governamentais e com a legislação é fundamental para impulsionar a economia circular e as práticas sustentáveis no setor siderúrgico, ainda que represente um desafio (Entrevistado 9). Para enfrentá-lo, é necessária adaptação, inovação e cooperação, regional e internacionalmente.

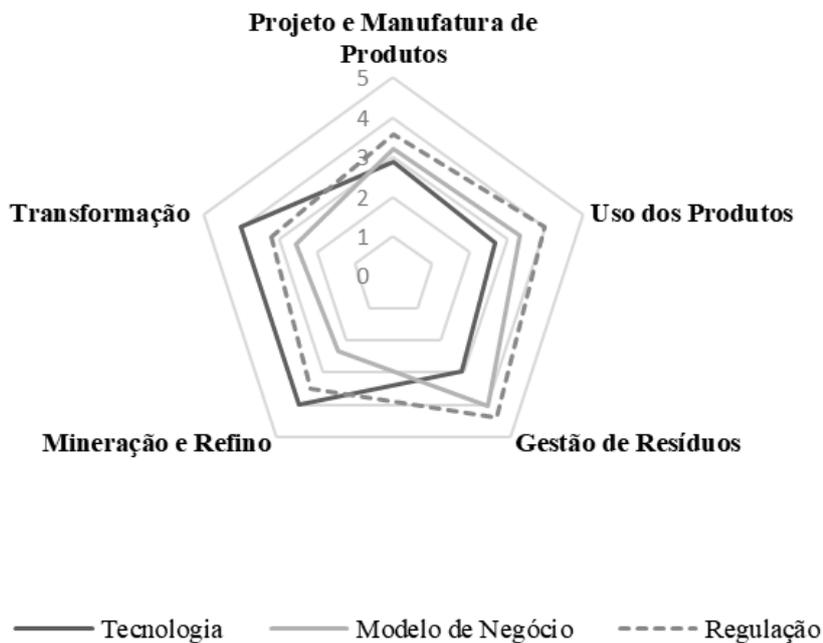
4.3.4 Priorização dos desafios por dimensões

Nesta etapa busca-se priorizar os desafios decorrentes das principais tendências elencadas para o setor de aço no Brasil para 2035. Os desafios decorrentes das vertentes tecnológicas, dos modelos de negócios e das questões regulatórias impactam a cadeia produtiva

e apontam para a necessidade de se criar estratégias para superá-los, integrando considerações ambientais, econômicas e sociais.

Na Figura 4, foram identificadas as avaliações dos entrevistados em relação à relevância das dimensões para cada etapa do ciclo do setor de aço no Brasil. O objetivo foi verificar as estratégias para superar os desafios, com foco nas tendências elencadas para o setor em relação à economia circular no Brasil em 2035.

Figura 4 – Priorização dos desafios: etapas × dimensões



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.4.1 Tecnologia

A dimensão de tecnologia apontou como mais relevantes as etapas de mineração e refino, e transformação. A indústria siderúrgica enfrenta o desafio de desenvolver e implementar tecnologias menos agressivas ao meio ambiente que sejam sustentáveis no processo produtivo. A busca por inovação e pesquisa é essencial para alcançar o objetivo de carbono neutro até 2050, especialmente em fases como refinamento e transformação, que são grandes consumidoras de energia e emitem bastante carbono. Existe também uma resistência do mercado em pagar mais por um aço de baixa pegada de carbono, o que dificulta a implementação de práticas de sustentabilidade.

4.3.4.2 Modelo de negócio

A dimensão de modelo de negócio teve como pontos mais relevantes as etapas de gestão de resíduos e uso de produtos. Nos modelos de negócios, há um complexo equilíbrio entre importação e produção doméstica, com tendência de algumas grandes usinas a preferirem importar aço, afetando a competitividade da produção nacional. Além disso, existe o desafio de adaptar a gestão de sucata, essencial para a produção sustentável de aço, o que pode significar mudanças na estrutura da cadeia de suprimentos. A dependência do preço da sucata e do custo da energia elétrica também são desafios significativos para a siderurgia secundária.

4.3.4.3 Regulação

A dimensão de regulação teve como pontos mais relevantes a etapa de gestão de resíduos, seguida de uso de produtos. Na regulamentação, o setor siderúrgico precisa navegar a transição para operações com emissão zero, o que é particularmente desafiador devido à alta intensidade de carbono do setor siderúrgico. A falta de políticas públicas com previsibilidade e clareza, como a precificação do carbono, é um empecilho significativo. Outrossim, a consciência do consumidor e a pressão por práticas sustentáveis podem influenciar o direcionamento do setor para a sustentabilidade, mais até do que os incentivos governamentais.

4.4 BOAS PRÁTICAS

Nesta seção discutir-se-ão as melhores práticas identificadas pelos especialistas da indústria do aço em relação à tecnologia, aos modelos de negócios e à regulamentação. Será apresentado, assim, um resumo dessas boas práticas, de forma a refletir uma visão estratégica para o setor até 2035.

4.4.1 Tecnologia

A reciclagem de sucata na produção de aço é amplamente reconhecida como uma prática sustentável e vantajosa, conforme o Entrevistado 6, que ressalta também uma expectativa de avanço tecnológico completo até 2035, facilitando a produção de aço de forma mais sustentável.

No mesmo contexto, o Entrevistado 8 aponta para a importância de utilizar diferentes tipos de sucata, aumentando assim a circularidade do aço. Ademais, o software CECarbon, destacado pelo Entrevistado 9, é indicado como uma ferramenta valiosa para medir o consumo energético e as emissões de carbono, beneficiando a fase de uso do aço. Os entrevistados 8 e 9 acrescentam entre as menções o Sistema de Informação do Desempenho da Construção (Sidac), que permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos de avaliação do ciclo de vida (ACV).

Além disso, segundo o Entrevistado 9, as práticas de construção industrializada são relevantes em razão da redução de resíduos e da eficiência na utilização de recursos, contribuindo para a sustentabilidade do setor. A especificação de materiais em conformidade com as exigências de sustentabilidade e os sistemas de certificação, como *Cradle to Cradle* (C2C), também são abordados pelo mesmo entrevistado como essenciais para atestar a sustentabilidade do processo.

A construção modular é uma tecnologia que produz em ambiente industrial grandes elementos 2D e 3D, posteriormente transportados e montados em um canteiro de obra. Tal prática minimiza a geração de resíduos e permite um controle mais eficiente dos recursos consumidos, além de favorecer a desmontagem e o reaproveitamento dos materiais, inclusive das estruturas de aço (Entrevistado 9). Uma amostra da evolução desse setor pode ser observada no *roadmap* publicado pela Aliança para a Construção Modular em 2024 (ABCM, 2024).

Já existem discussões e práticas de aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para utilização como combustível nos fornos, como mencionado no contexto da indústria do cimento. Essa prática pode ser uma precursora de tendências para a indústria do aço, visando a redução de emissões e melhor aproveitamento de resíduos (Entrevistada 9).

Com relação à mineração de ferro, a reutilização de materiais de mineração é mencionada como uma boa prática, por exemplo em barragens desativadas que contêm materiais de qualidade superior aos que estão sendo prospectados atualmente, objetivando reintegrá-los no ciclo produtivo (Entrevistado 6).

Na etapa de mineração e refino, a reciclagem de todos os resíduos, incluindo a carepa de laminação, é considerada uma prática relevante. Anteriormente não aproveitada, a carepa agora é integrada na produção de minério de ferro, otimizando o uso dos subprodutos do processo siderúrgico (Entrevistado 2).

A precificação do carbono pode levar os usuários do aço a melhorarem seus processos e a adotarem soluções mais eficientes. Destaca-se que as boas práticas passam pela inovação e a busca constante por processos mais eficientes e com menor impacto ambiental (Entrevistado 8).

4.4.2 Modelos de negócios

A mineração urbana é uma tendência que ganha destaque para o Entrevistado 1. Ele ressalta que 35% da produção de aço no Brasil provém da reciclagem de sucata, epitomizando o conceito de economia circular na indústria.

Os Entrevistados 3 e 7 comentam sobre outra boa prática de investimento em pesquisa e desenvolvimento de projetos de inovação das seguintes empresas: Tupy, BMW Group Brasil, Senai Paraná e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). O projeto contempla a reciclagem de baterias de veículos elétricos por meio da recuperação de compostos químicos de baterias por hidrometalurgia, processo mais sustentável que o tradicional. A tecnologia envolve menos emissões e utiliza a mineração urbana. Com isso é possível implementar modelos de negócios em que a circularidade é a estratégia principal.

O Entrevistado 6 também contribuiu para o entendimento de que o mercado de sucata se direciona cada vez mais para a sustentabilidade, e reconhece a importância do aço nesse contexto. Ele menciona que o setor de reciclagem da sucata, em particular o do aço, não é motivado apenas pela ideia de “aço circular”, mas também pela função essencial do carbono e por metas para descarbonizar. Exemplo disso é a Tegra, uma construtora em São Paulo que comprou produtos específicos com um custo maior inicialmente, mas conseguindo recuperar os valores por meio dos benefícios como o financiamento verde e o aumento da demanda por construções sustentáveis, que incluem o uso de aço proveniente da reciclagem.

4.4.3 Regulação

O Entrevistado 1 menciona o exemplo de uma das maiores empresas da indústria do aço, que está atuando fortemente na gestão de resíduos, pressionando por mudanças de legislação para facilitar a reciclagem de carros apreendidos. Isso indica a importância das boas práticas de coleta e reciclagem de resíduos.

A conscientização e a coordenação dos sucateiros para enviar a sucata dentro das normas adequadas também é enfatizada como uma prática positiva pelo Entrevistado 4. Empresas do setor da cadeia estão tomando medidas de destinação adequada de resíduos, separando os que podem ser nocivos e exigem cuidado especial dos que não são contaminantes e que podem ser adequadamente reaproveitados, como o resíduo de cobre.

A boa prática indicada pelo Entrevistado 8 é a preparação da indústria siderúrgica para políticas de baixo carbono, que ainda não foram implementadas. Isso sugere que, para uma economia circular eficiente, é preciso ter políticas e regulamentações que incentivem práticas sustentáveis e que internalizem o custo ambiental.

Essas práticas refletem os passos que estão sendo dados pelo setor de aço brasileiro em busca de um futuro mais verde e economicamente viável, abordando inovação e eficiência como pilares fundamentais.

4.5 RESUMO

Consolidando os resultados deste capítulo, segue o Quadro 6, relacionando as principais tendências, que se desdobram os desafios.

As boas práticas indicam que existem ações de diversos atores da cadeia já em andamento para que o setor de aço caminhe mais rapidamente para uma economia circular. O conceito de economia circular não é apenas uma tendência passageira, e sim um paradigma que veio para remodelar permanentemente as práticas do setor siderúrgico.

Quadro 6 – Consolidação de tendências, desafios e boas práticas

Estratégias	Tendências	Desafios	Boas Práticas
Tecnologia	Para as etapas de produção de ferro e aço: adoção de tecnologias limpas e de processos de produção que tenham eficiência energética	Etapa de produção de ferro na rota primária e aumento de consumo de sucata de 15% para 30% Desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio renovável na redução do minério de ferro com escala, fornecendo um caminho viável para a produção de aço primário com emissões mínimas Tecnologias de ruptura que ainda não estão totalmente desenvolvidas ou disponíveis em larga escala e com custos compatíveis com os atuais são essenciais para que se atinja o objetivo de carbono neutro até 2050	
	Uso de energias renováveis, como a biomassa, com utilização de carvão vegetal como vantagem competitiva do país, além dos benefícios de maior captura de CO ₂ e melhora da qualidade de características técnicas finais do aço produzido com essa tecnologia	Aumentar a utilização de carvão vegetal na produção de ferro	
	Etapa de mineração e refino: reutilização de recursos de rejeitos limitados, como o próprio minério de ferro. Na etapa de transformação a redução de desperdício	Aumento da recuperação do aço a partir de escórias de processos anteriores	A reutilização de materiais de mineração é mencionada como uma boa prática, por exemplo em barragens desativadas que contêm materiais de qualidade superior aos que estão sendo prospectados atualmente
	O reaproveitamento mais intensivo da sucata nos processos primários e secundários	A dependência do preço da sucata e do custo da energia elétrica também são desafios significativos para a siderurgia secundária	
	Uso de ferroligas (com nióbio, por exemplo) para melhorar o desempenho do aço e o aumento da vida útil nas mais diversas aplicações.		
	Digitalização e uso de inteligência artificial para a produtividade nos processos, inclusive para determinar indicadores de sustentabilidade em cada etapa da cadeia do aço		O software CECarbon é indicado como uma ferramenta valiosa para medir o consumo energético e as emissões de carbono, beneficiando a fase de uso do aço
			Sistema de Informação do Desempenho da Construção (Sidac), que permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos de avaliação do ciclo de vida (ACV)

Continua

Continuação

Estratégias	Tendências	Desafios	Boas Práticas
Modelos de Negócios	A mobilização sem precedentes da sociedade e a conscientização ambiental estão exercendo pressão significativa sobre as empresas, especialmente aquelas inseridas em cadeias produtivas de grande impacto no meio ambiente	Resistência do mercado a pagar mais por um aço de baixa pegada de carbono, o que dificulta a implementação de práticas de sustentabilidade	
	Desenvolvimento do setor de gestão de resíduos, notadamente da sucata, para otimização de sua reciclagem em toda a cadeia		
	Modelos de negócio que proporcionem mais flexibilidade dos usos de materiais e escala na gestão de resíduos		Práticas de RSU para utilização como combustível nos fornos, como mencionado no contexto da indústria do cimento
	Modelos de negócio que incorporem princípios da economia circular, como o design pensado para a reciclagem e a eficiência na utilização das matérias-primas, o que inclui a facilidade de desmontagem no final da vida útil, como também os serviços de manutenção dos produtos	Dificuldade de implementar práticas de sustentabilidade, já que estas poderiam aumentar os custos de produção. Há uma resistência do mercado a pagar mais pelo aço, mesmo que seja com uma pegada de carbono baixa ou neutra	A construção modular é uma tecnologia que produz em ambiente industrial grandes elementos 2D e 3D, posteriormente transportados e montados em um canteiro de obras. Roadmap publicado pela Aliança para a Construção Modular em 2024
	O aumento de sucata por obsolescência e modelos de gestão de resíduos mais voltados às demandas dos clientes geram oportunidades na cadeia, inclusive para a otimização da infraestrutura de coleta e para a mineração urbana de elementos com maior valor agregado	A siderurgia secundária enfrenta o desafio da dependência do preço da sucata e do custo da energia elétrica, fatores essenciais para a produção de aço a partir de materiais reciclados	Projetos que envolvem academia, iniciativa e órgãos de inovação do governo, como o projeto da Tupy, que contempla a reciclagem de baterias de veículos elétricos por meio da recuperação de compostos químicos de baterias por hidrometalurgia, processo mais sustentável que o tradicional
Regulação	Em decorrência das metas de neutralidade das emissões de carbono, a implementação de mecanismos regulatórios, como a taxação de carbono, dentre outros instrumentos de gestão ambiental, será necessária	Políticas públicas com previsibilidade e de incentivos claros, como a precificação do carbono. Sem uma política efetiva nesse sentido, torna-se difícil motivar a indústria a migrar para uma economia de baixo uso de carbono	
	Implementação de incentivos financeiros e regulatórios para as práticas sustentáveis, principalmente para os investimentos para as mudanças necessárias	A regulamentação é essencial e um desafio em si, pois, enquanto buscam proteger a indústria nacional, as empresas também podem restringir sua eficácia em um mercado global competitivo	Tegra, uma construtora em São Paulo que comprou produtos específicos com um custo maior inicialmente, mas que conseguiu recuperar os valores por meio de benefícios como o financiamento verde e o aumento da demanda por construções sustentáveis, que incluem o uso de aço proveniente da reciclagem
		Integração de políticas corporativas que realcem a reciclagem e a reutilização de materiais	

Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste trabalho, foram explorados o panorama atual e as tendências para o setor do aço no Brasil para 2035, destacando-se a transição para práticas sustentáveis e inovadoras com o intuito de alcançar uma economia circular robusta e a meta de redução de emissões.

5.1 TENDÊNCIAS PARA 2035

As principais tendências identificadas apontam para a economia circular como um novo paradigma, não mais um conceito transitório, mas uma realidade iminente que demanda uma remodelação contínua de práticas no setor siderúrgico. Essa tendência se solidifica à medida que o setor enfrenta a necessidade de se alinhar a metas ambiciosas de redução de emissões de carbono, em resposta a uma crise climática crescente e à pressão por responsabilidade ambiental tanto de reguladores como de clientes corporativos. Essa pressão é complementada pela introdução de mecanismos regulatórios, como a taxaço de carbono, as regulações internacionais e locais, e as crescentes expectativas do mercado por práticas empresariais sustentáveis.

As principais tendências para 2035 no setor do aço no Brasil com foco na economia circular identificadas pelos entrevistados são a redução nas emissões, a gestão de resíduos e a regulação. No caso da redução de emissões, é necessária a adoção de tecnologias que enfoquem as rotas de produção de aço primárias e secundárias, que apresentam as maiores emissões na cadeia produtiva. Essas tecnologias envolvem: 1) uso inovador de hidrogênio renovável na redução do minério de ferro, representando um caminho viável para produzir aço primário com emissões mínimas; 2) aproveitamento de alto-forno a carvão vegetal como uma alternativa não fóssil e sustentável, o que destaca o Brasil no caminho da inovação; e 3) incremento no uso de sucata para reduzir a temperatura do forno na produção de aço e como estratégia para aumentar a porcentagem de reciclagem de 15% para 30%, visando reduzir emissões mediante melhorias tecnológicas.

Sobre a gestão de resíduos, é preciso considerar: 1) que os atuais custos de insumos brutos e as novas tecnologias reforçam a tendência ao reaproveitamento de resíduos como minério de ferro e materiais anteriormente considerados de menor valor, o que pode ser observado no aumento da recuperação do aço a partir de escórias de processos anteriores; 2) o uso crescente de materiais recicláveis na produção do aço e o estímulo à produção interna de sucata, buscando reduzir a dependência de importações; e 3) a manutenção do modelo de

negócio dos sucateiros no Brasil, evitando a formação de *players* muito poderosos no mercado, o que poderia desequilibrar as condições de mercado

Por fim, a regulação parece ser a ferramenta de maior efetividade na transição da economia linear para circular, mediante ações como: 1) implementação de incentivos e regulação de práticas para favorecer uma transição para um cenário de baixas emissões; 2) incentivos financeiros e regulatórios às empresas para adotarem práticas da economia circular com eficácia e dedicação, tendo em vista investimentos iniciais mais elevados; e 3) apreciação da necessidade de adaptação às políticas de sustentabilidade para evitar futuros impactos nos preços e na demanda por aço e sucata. Por meio de utilização de políticas públicas para promover a reciclagem nos diversos setores relacionados à cadeia do aço e a outros processos que possam influenciar a dinâmica de preços no mercado de sucata.

Essas tendências refletem a mudança de paradigma em favor da economia circular e indicam uma indústria do aço focada na inovação e eficiência para se manter competitiva diante das exigências de um mercado global preocupado com as questões ambientais.

As análises comparativas entre as tendências apontadas por especialistas no setor do aço, de forma geral, revelam que o Brasil se alinha com o movimento global em várias etapas do ciclo do aço, focando principalmente a otimização do uso de recursos e a adoção de processos que reduzam as emissões por meio de inovação tecnológica. Globalmente, sobretudo em países mais desenvolvidos, a regulação para o mercado de carbono, além de muitos projetos, conta com apoio financeiro do governo para fomentar tecnologias de baixa emissão. No Brasil a regulação do mercado de carbono está sendo capitaneada pelo governo federal, por meio de discussões envolvendo a cadeia produtiva e os demais atores impactados, buscando o estabelecimento de metas setoriais. Adicionalmente, as principais vantagens competitivas para reduzir as emissões no Brasil são a adoção de hidrogênio verde renovável e a utilização de carvão vegetal não fóssil nos processos de mineração e refino.

Contudo, o país enfrenta desafios específicos, como a gestão de resíduos em estágios menos maduros, em comparação com o mercado dos Estados Unidos, bem como a necessidade de criação de políticas públicas mais efetivas, que impulsionem a economia circular, contrastando com a tendência global de intensificar o uso de recursos regenerados e políticas regulatórias sustentáveis.

Em resumo, o Brasil está alinhado com as tendências globais de sustentabilidade e circularidade na indústria siderúrgica, mas apresenta desafios e estágios de implementação particulares. Os altos níveis de desigualdade econômica e social, a situação demográfica

complexa e multifacetada, além do crescimento do setor ainda estagnado nas últimas décadas, refletem divergências estruturais no estágio atual do setor.

5.2 DESAFIOS

No tocante aos desafios, nesta pesquisa, segundo a opinião dos especialistas, se destacou especialmente a dimensão tecnológica para reduzir o uso de recursos nas etapas de mineração e refino, assim como na etapa de transformação, que emergem como momentos críticos devido a seu elevado consumo de energia e consequentes emissões de carbono. Foi enfatizada a necessidade de inovação e pesquisa para desenvolver tecnologias ambientalmente sustentáveis que, além de reduzir e reutilizar recursos, permitam ao setor evoluir na circularidade.

Para potencializar o impacto da economia circular na cadeia do setor do aço, é essencial uma ação integrada entre todos os segmentos envolvidos. Uma das estratégias mais eficazes é a desmaterialização, que abrange desde a concepção no design dos produtos até a utilização otimizada dos materiais. Por exemplo, o uso de ligas específicas pode reduzir o consumo de recursos, ao mesmo tempo que se agregam características técnicas desejáveis. Esse enfoque visa consumir menos recursos enquanto atende aos requisitos de desempenho. Outro benefício importante da integração é o design que considere a desmontagem do produto no final de sua vida útil. Isso facilita os processos de redução, reutilização, remanufatura e reciclagem. Projetos que incorporam esses princípios tornam mais eficiente a recuperação de materiais e componentes, minimizando os resíduos, melhorando a eficiência econômica e produtiva, e promovendo uma economia circular. Entretanto, o racional por trás disso parece estar atrelado mais à lógica contínua de redução de custo, o que está alinhado com o modelo de negócio atual, sendo o conceito de economia circular um subproduto dessa lógica empresarial ao invés do foco da estratégia.

Embora o enfoque observado na literatura e nas entrevistas tenha dado protagonismo à gestão de resíduos, a economia circular é um conceito muito mais amplo, o que denota a oportunidade ainda por ser capturada pelo setor. Também é importante salientar o aspecto social envolvido na economia circular do aço. Ela tem o potencial de proporcionar vários benefícios sociais, incluindo a criação de novos empregos em setores como reparação e reciclagem, embora os entrevistados tenham levantado a questão da precariedade de condições nesse segmento. O desafio é encontrar uma forma de promover a qualificação da força de trabalho e auxiliar na redução das desigualdades sociais.

A resistência do mercado a custear o prêmio por aço de menor impacto ambiental – ou seja, o consumidor ainda não está sensível ao valor que produtos de menor impacto nas emissões de carbono – é um dos elementos que contribui para o aquecimento global. Isso representa outro desafio significativo, sinalizando a importância de criar estratégias eficazes de superação que denotem a necessidade de campanhas de comunicação para incentivar o consumo consciente, fortalecendo a responsabilidade social e ambiental dos consumidores. As estratégias também podem incluir incentivos governamentais e um enquadramento competitivo de mercado, como a taxação de carbono dos produtos.

Como é possível perceber, é necessário gerar o senso de urgência ao longo de toda a cadeia. A implementação célere do mercado de carbono regulado pode ser o catalisador das mudanças tão necessárias, consolidando assim a lógica da economia circular de uma forma abrangente no setor.

5.3 BOAS PRÁTICAS

As boas práticas sugeridas pelo painel de especialistas envolvem a implementação de tecnologias que respeitem o meio ambiente, a adaptação de modelos de negócios alinhados com o conceito de economia circular e o atendimento a regulamentações ambientais estritas atualmente em vigor.

A convergência de opiniões entre os entrevistados indica que a tecnologia, o modelo de negócios e a regulação são fundamentais para promover maior uso de resíduos para aumentar a circularidade do setor de aço.

Além disso, a cooperação e coordenação global para promover políticas regulatórias sustentáveis é vista como uma meta alcançável, apesar das diferenças nos estágios de implementação e dos desafios regionais.

Para o setor siderúrgico brasileiro evoluir em termos de economia circular até 2035, de acordo com as expectativas globais e nacionais, é imprescindível uma mentalidade estratégica que priorize inovações, integrando considerações ambientais, econômicas e sociais, para superar os desafios e capitalizar as oportunidades desse novo cenário industrial.

5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Apesar de reunir a opinião de diversos especialistas do setor, esse estudo apresenta algumas limitações que merecem ser destacadas para contextualizar os resultados e orientar investigações futuras.

Uma limitação inerente a esse tipo de pesquisa é o potencial viés nos depoimentos dos entrevistados, o que pode influenciar os resultados obtidos. É possível que as opiniões compartilhadas sejam parciais e reflitam as experiências pessoais dos participantes, que podem não ser representativas de toda a indústria.

A quantidade de entrevistas é outro ponto relevante. Por se tratar de um setor que engloba diversas indústrias da cadeia como construção, automobilística e equipamentos, seria interessante ter um número maior de entrevistas com especialistas de diversas áreas da cadeia de valor do aço.

A cadeia logística, muito relevante e complexa, não foi objeto deste estudo, que se restringiu à compreensão mais ampla dos desafios e oportunidades.

Um ponto que acabou não aparecendo nas entrevistas, por exemplo, foi a questão da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos fabricados (logística reversa), no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010). Os aperfeiçoamentos nessa legislação poderiam levar a avanços no setor de sucata.

Essas limitações destacam a necessidade de abordagens futuras que incorporem mais dados quantitativos, aumentem o número de entrevistados e diversifiquem as áreas de especialização para incluir toda a extensão da cadeia de valor. Além disso, recomenda-se a atualização constante dos dados para acompanhar a velocidade das mudanças no setor. Pesquisas futuras também devem considerar formas de mitigar o viés do pesquisador e garantir que a confidencialidade não restrinja a riqueza de conhecimento compartilhado pelos especialistas.

5.5 SUGESTÕES PARA ESTUDO FUTUROS

Em continuidade à pesquisa, a proposta de um *roadmap* para o Brasil seria muito relevante para nortear as principais ações para o setor do aço nos próximos anos. Ao considerar as direções para pesquisas futuras nesse campo, algumas áreas de estudo podem ser particularmente promissoras, como as apresentadas a seguir.

Logística sustentável na indústria do aço: diante do compromisso de grandes empresas de mineração de ferro em reduzir a pegada de carbono, inclusive no uso de combustíveis fósseis em sua logística, é vital explorar o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis. Pesquisas que visem otimizar rotas, melhorar a eficiência de trens e caminhões e incorporar fontes de

energia limpa podem ser bastante valiosas para definir as emissões de toda a cadeia (*upstream* e *downstream*).

Emprego de biomassa siderúrgica brasileira: a utilização de biomassa, em especial o uso do carvão vegetal em alto-forno, representa uma prática exclusiva e sustentável do Brasil. Estudos que se aprofundem na implementação de forma mais representativa dessa prática, explorando seu diferencial na qualidade dos produtos, podem revelar *insights* importantes para a competitividade e sustentabilidade do setor. Comparar as práticas brasileiras com as de outros mercados e investigar políticas públicas e regulamentações internacionais bem-sucedidas também são indicadas para identificar modelos adaptáveis ao Brasil.

Aproveitamento de escória e resíduos siderúrgicos: as entrevistas apontam para a existência de oportunidades de recuperação de aço contido nas escórias de aciaria, sugerindo que estão direcionados à inovação em processos de recuperação e reciclagem de metal, a partir de resíduos que podem conduzir a avanços significativos na circularidade do setor.

Ampliação do uso de sucata: a investigação sobre como elevar o uso de sucata na produção de aço na rota primária, além de explorar tecnologias e processos inovadores para a rota secundária, em que a sucata é a principal fonte metálica, é essencial para impulsionar a economia circular.

Explorar a economia circular do aço por meio da análise do ciclo de vida social para reforçar os benefícios que também podem ser incorporados na sociedade.

Integração de energias renováveis: é fundamental o aprofundamento na integração de energias renováveis da produção siderúrgica, visando a redução de emissões de CO₂, incluindo o potencial do hidrogênio e amônia verde, assim como tecnologias de captura de carbono, considerando a matriz energética mais favorável do Brasil.

Todas essas áreas não apenas apoiam o avanço tecnológico e sustentável no Brasil, como também contribuem para os esforços globais de redução de emissões decorrente das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ABCM. (2024). Roadmap Brasil da construção modular. São Paulo, SP: ABCM. Recuperado de https://abcm modular.com.br/plataforma/files/documentos/RoadMap_ABC_DIGITAL.pdf
- Ahmadinia, M., Velenturf, A., Setchi, R., Evans, S. L., McKendree, J., & Bolton, J. (2022). Transforming the uk metal industries: Challenges and opportunities. Paper presented at the *9th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing* (pp. 43-56). Singapore.
- Alacero. (2022). *Summit Alacero 2022*. Recuperado de <https://www.alacero.org/>
- Allwood, J. M., Cullen, J. M., & Milford, R. L. (2010). Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050. *Environmental Science & Technology*, *44*(6), 1888-1894. doi: <https://doi.org/10.1021/es902909k>.
- Andrade, M. L. A. D., Cunha, L. M. D. S., & Gandra, G. T. (2000). *A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial*. Brasília, DF: BNDES.
- ArcelorMittal. (2022a). *Apresentação Institucional 2022*. Recuperado de <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/publicacoes-relatorios>
- ArcelorMittal. (2022b). *Relatório de Sustentabilidade Arcelor Mittal 2022*. Recuperado de <https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/publicacoes-relatorios/brasil/relatorio-de-sustentabilidade-2022>
- Ashraf, F., Lodh, A., Pagone, E., & Castelluccio, G. M. (2023). Revitalising metallic materials: A path towards a sustainable circular economy. *Sustainability*, *15*(15). doi: <https://doi.org/10.3390/su151511675>.
- Assunção, F. C. R. (2010). *Siderurgia no Brasil 2010-2025: subsídios para tomada de decisão*. Brasília, DF: CGEE. Recuperado de https://www.cg ee.org.br/documents/10195/11009594/Siderurgia_no_Brasil__9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.6
- Bataille, C., Stiebert, S., Hebeda, O., Trollip, H., McCall, B., & Vishwanathan, S. S. (2023). Towards net-zero emissions concrete and steel in India, Brazil and South Africa. *Climate Policy*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2187750>.
- Bataille, C., Stiebert, S., & Li, F. G. N. (2021). *Global facility level net-zero steel pathways*. Paris: IDDRI.
- Bocken, N. M. P., Pauw, I., Bakker, C., & Van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, *33*(5), 308-320. doi: <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>.
- Branca, T. A., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A. . . , & Rosendahl, S. (2020). Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals*, *10*(3). doi: <https://doi.org/10.3390/met10030345>.

Carmignano, O. R., Vieira, S. S., Teixeira, A. P. C., Lameiras, F. S., Brandão, P. R. G., & Lago, R., M. (2021). Iron ore tailings: Characterization and applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 32(10), 1895-1911. doi: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>.

Carvalho, D. (2024, 30 de Janeiro). What's next for green steelmaking technologies? *Woodmackenzie*. Recuperado de <https://www.woodmac.com/news/opinion/whats-next-for-green-steel-technologies/>

Cavaliere, P. (2019). *Clean ironmaking and steelmaking processes: Efficient technologies for greenhouse emissions abatement*. New York, NY: Springer.

Cleveland, C. J., & Ruth, M. (1998). Indicators of dematerialization and the materials intensity of use. *Journal of Industrial Ecology*, 2(3), 15-50. doi: <https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.3.15>.

Cocchieri, T. (2008). *Criatividade em uma perspectiva estético-cognitiva* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Marília, SP.

Comissão Europeia. (2015). Fechar o ciclo-plano de ação da UE para a economia circular. *Official Journal of the European Union*, 24.

Corley, K. G., & Gioia, D. A. (2011). Building theory about theory building: What constitutes a theoretical contribution? *Academy of Management Review*, 36(1), 12-32.

Cossu, R., & Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Manag*, 45, 1-3. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>.

Di Maio, F., & Rem, P. (2015). A robust indicator for promoting circular economy through recycling. *Journal of Environmental Protection*, 6(10), 1095-1104. doi: <http://doi.org/10.4236/jep.2015.610096>.

Dragt, E. (2017). *How to research trends: Move beyond trend watching to kickstart innovation*. London: Laurence King Publishing.

EuRIC. (2023). *4 Recyclers's priorities 2024-2029*. Brussels: EuRIC. Recuperado de https://euric-aisbl.eu/images/Position-papers/EuRIC_Priorities_2024-2029.pdf

Eurofer. (2021). *European steel in figures*. Recuperado de <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2021/European-Steel-in-Figures-2021.pdf>

Fan, Z., & Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 5(4), 829-862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.

Fărcean, I., Proștean, G., & Socalici, A. (2023). Sustainable development indicators in the steel industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 2540(1). Doi <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2540/1/012045>.

Flores-Granobles, M., & Saeys, M. (2020). Minimizing CO₂ emissions with renewable energy: A comparative study of emerging technologies in the steel industry. *Energy & Environmental Science*, 13(7), 1923-1932. doi: <https://doi.org/10.1039/D0EE00787K>.

Gerdau. (2024). *Apresentação institucional*. Recuperado de <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/21e1d193-5cab-456d-8bb8-f00a49a43c1c/564f5587-ef21-47d8-6b54-84678f6f0b99?origin=1>

Gomes, N. P., Cohen, S. A. M., & Flores, A. M. M. (2018). Estudos de tendências: Contributo para uma abordagem de análise e gestão da cultura. *ModaPalavra*, 11(22), 49-81. doi: <https://doi.org/10.5965/1982615x11222018049>.

Graedel, T. E. (2011). The prospects for urban mining. *Bridge*, 41(1), 43-50.

Graedel, T. E., Reck, B. K., Ciacci, L., & Passarini, F. (2019). On the spatial dimension of the circular economy. *Resources*, 8(1). doi: <https://doi.org/10.3390/resources8010032>.

Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 765-777. doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>.

Hoon, C., & Baluch, A. M. (2020). The role of dialectical interrogation in review studies: Theorizing from what we see rather than what we have already seen. *Journal of Management Studies*, 57(6), 1246-1271. doi: <https://doi.org/10.1111/joms.12543>.

IEA. (2020). *Iron and steel technology roadmap*. Paris: IEA. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

IEA. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. Paris: IEA. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IEA. (2023a). Emissions measurement and data collection for a net zero steel industry. Paris: IEA. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/emissions-measurement-and-data-collection-for-a-net-zero-steel-industry>

IEA. (2023b). *World Energy Outlook 2023* IEA. Paris: IEA. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

Imperatives, S. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future*.

Instituto Aço Brasil. (2020). *Aço & sustentabilidade 2020*. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Aço Brasil. Recuperado de <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>

Instituto Aço Brasil. (2023). *Aço & sustentabilidade 2023*. Rio de Janeiro, RJ: Instituto Aço Brasil. Recuperado de https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/AcoBrasil_SUSTENTABILIDADE_2023.pdf

Issa, T., Chang, V., & Issa, T. B. T. (2014). Sustainable business strategies and PESTEL framework. *GSTF Journal on Computing*, 1(1). doi: http://doi.org/10.5176/2010-2283_1.1.13.

IRENA. (2023). *Towards a circular steel industry*. Abu Dhabi: Irena. Recuperado de https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_G20_circular-steel_industry_2023.pdf?rev=d73e2b34bcc14aeebf395b47ccc67573

Javaid, A., & Essadiqi, E. (2003). Final report on scrap management, sorting and classification of steel. *Natural Resources Canada*, 23, 1-22. doi: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.29333.12003>.

Li, X., Chertow, M., Guo, S., Johnson, E., & Jiang, D. (2020). Estimating non-hazardous industrial waste generation by sector, location, and year in the United States: A methodological framework and case example of spent foundry sand. *Waste Management*, 118, 563-572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.056>.

Lei, T., Wang, D., Yu, X., Ma, S., Zhao, W., Cui, C., ... & Guan, D. (2023). Global iron and steel plant CO₂ emissions and carbon-neutrality pathways. *Nature*, 622(7983), 514-520. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06486-7>.

Lopez, G., Farfan, J., & Breyer, C. (2022). Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel. *Journal of Cleaner Production*, 375. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134182>.

MacArthur, E., & Heading, H. (2019). How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Found*, 1, 1-71.

Magacho, G., Espagne, E., & Godin, A. (2024). Impacts of the CBAM on EU trade partners: Consequences for developing countries. *Climate Policy*, 24(2), 243-259. doi: <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2200758>.

Mandová, H., Vass, T., Pales, A. F., Levi, P., & Gül, T. (2020, 19 de setembro). The challenge of reaching zero emissions in heavy industry. *International Energy Agency*. Recuperado de <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry>

McNulty, T., Zattoni, A., & Douglas, T. (2013). Developing corporate governance research through qualitative methods: A review of previous studies. *Corporate Governance: An International Review*, 21(2), 183-198. doi: <https://doi.org/10.1111/corg.12006>.

Melo, L. P. B., & Silva, C. L. (2022). Níveis de implementação da economia circular: micro, meso e macro. *Revista Tecnologia e Sociedade*, 18(53), 19-35. doi: <http://doi.org/10.3895/rts.v18n53.15831>.

Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.

Munaro, M. R., & Tavares, S. F. (2023). A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective. *Cleaner and Responsible Consumption*, 8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100107>.

- Munaro, M. R., Tavares, S. F., & Bragança, L. (2020). Towards circular and more sustainable buildings: A systematic literature review on the circular economy in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, 260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121134>.
- Nogueira, I. M., & Madureira, M. T. (2022). A indústria siderúrgica no Brasil. *Research, Society and Development*, 11(16). doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38241>.
- Norgate, T. E., Jahanshahi, S., Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15(8-9), 838-848. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>.
- Pauliuk, S., Wang, T., & Müller, D. B. (2012). Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle. *Environmental Science & Technology*, 46(1), 148-154. doi: <https://doi.org/10.1021/es201904c>.
- Payne, S. L. B. (2014). *The art of asking question: Studies in public opinion*, 3. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Rebitzer, G., & Hunkeler, D. (2003). Life cycle costing in LCM: Ambitions, opportunities, and limitations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8, 253-256. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02978913>.
- Rech, S. R. (2016). *A qualitative research on trends studies*. Artigo apresentado no III International Fashion and Design Congress, Buenos Aires.
- Rech, S. R., & Maciel, D. M. H. (2015). *A proposal for prospective method based on grounded theory*. Artigo apresentado na XI International European Academy of Design Conference.
- Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, 337(6095), 690-695. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1217501>.
- Reck, B. K., Müller, D. B., Rostkowski, K., & Graedel, T. E. (2008). Anthropogenic nickel cycle: Insights into use, trade, and recycling. *Environmental Science & Technology*, 42(9), 3394-3400. doi: <https://doi.org/10.1021/es072108l>.
- Scania. (2023). *Metas da Scania baseadas na ciência*. Recuperado de <https://www.scania.com/br/pt/home/about-scania/sustainability/scanias-science-based-targets.html>
- Silveira, C. S., & Oliveira, L. (2021). Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. *Novos Cadernos NAEA*, 24(3). doi: <http://dx.doi.org/10.18542/ncn.v24i3.9354>.
- Sonter, L. J., Barrett, D. J., Moran, C. J., & Soares-Filho, B. S. (2015). Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil's steel industry. *Nature Climate Change*, 5(4), 359-363. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate2515>.
- Souza, J. F. T., & Pacca, S. A. (2021). Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>.

Spaulding, S. A., Irvin, L. K., Horner, R. H., May, S. L., Emeldi, M., Tobin, T. J., & Sugai, G. (2010). Schoolwide social-behavioral climate, student problem behavior, and related administrative decisions: Empirical patterns from 1,510 schools nationwide. *Journal of Positive Behavior Interventions*, 12(2), 69-85. doi: <https://doi.org/10.1177/1098300708329011>.

Telles, R. (2001). O conceito de matriz de amarração. *Revista de Administração*, 36(4), 64-72.

Thomas, J. S., & Birat, J. P. (2013). Methodologies to measure the sustainability of materials: Focus on recycling aspects. *Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques*, 110(1), 3-16. <https://doi.org/10.1051/metal/2013054>.

Tingley, D. D., Cooper, S., & Cullen, J. (2017). Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective. *Journal of Cleaner Production*, 148, 642-652. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.006>.

Van der Voet, E., Salminen, R., Eckelman, M., Mudd, G., Norgate, T., & Hirschier, R. (2013). *Environmental challenges of anthropogenic metals flows and cycles*. Paris: Unep.

Van der Voet, E., Van Oers, L., Nikolic, I. (2004). Dematerialization: Not just a matter of weight. *Journal of Industrial Ecology*, 8(4), 121-137. doi: <https://doi.org/10.1162/1088198043630432>.

Van Soest, H. L., Den Elzen, M. G., & Van Vuuren, D. P. (2021). Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nature Communications*, 12(1), 2140. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22294-x>.

Volvo. (2024). Sustentabilidade: ações e marcos. Recuperado de <https://www.volvocars.com/br/v/sustainability/climate-action>

Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y., Feng, K., Kara, S., Hauschild, M., & Chen, W. Q. (2021). Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply-and demand-side mitigation efforts. *Nature Communications*, 12(1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>.

WSA. (2021). *Climate change and the production of iron and steel*. Recuperado de <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Climate-policy-paper-2021-1.pdf>

WSA. (2023a). Circular economy/steel: The permanent material in the circular economy. |Recuperado de <https://worldsteel.org/circular-economy/>

WSA. (2023b). Sustainability indicators 2023 report. Recuperado de <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators-2023-report/>

WSA. (2023c). *World Steel in Figures 2023*. Recuperado de <https://worldsteel.org/publications/bookshop/world-steel-in-figures-2023/>

Xavier, L. H., Giese, E. C., Ribeiro-Duthie, A. C., & Lins, F. A. F. (2021). Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, 74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>.

Xiao, Y., Ma, D., Zhang, F., Zhao, N., Wang, L., Guo, Z., ... & Xiao, Y. (2023). Spatiotemporal differentiation of carbon emission efficiency and influencing factors: From the perspective of 136 countries. *Science of the Total Environment*, 879. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163032>.

Xylia, M., Silveira, S., Duerinck, J., & Meinke-Hubeny, F. (2018). Weighing regional scrap availability in global pathways for steel production processes. *Energy Efficiency*, 11, 1135-1159. doi: <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9583-7>.

Yuan, S., Zhang, Q., Yin, H., & Li, Y. (2021). Efficient iron recovery from iron tailings using advanced suspension reduction technology: A study of reaction kinetics, phase transformation, and structure evolution. *Journal of Hazardous Materials*, 404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124067>.

Yüksel, I. (2012). Developing a multi-criteria decision making model for PESTEL analysis. *International Journal of Business and Management*, 7(24). doi: <http://doi.org/10.5539/ijbm.v7n24p52>.

ANEXO I: ROTEIRO DA ENTREVISTA

1. Introdução e *disclaimer*.
2. Contexto: Cenário atual do mundo e do Brasil no setor do aço em termos de sustentabilidade com foco em economia circular.
3. Tendências para 2035: desafios da sustentabilidade e impactos na competitividade no setor de aço brasileiro.
 1. Quais seriam seus comentários gerais sobre este tema em relação à economia circular?
4. Explorar as questões dos objetivos específicos.
 1. Quais as tendências de sustentabilidade do setor do aço brasileiro, assegurando sua competitividade nas etapas da cadeia circular?
 1. Mineração e refino
 2. Ligas de laminação
 - Redução de carbono, tema energético
 - Impacto de crédito e carbono
 3. Manufatura de produtos
 - Tendência de desenvolvimento de produtos mais duráveis e com serviços de assistência técnica
 4. Uso de produtos
 - Remanufatura, requalificação e reparação de produtos
 5. Gestão de resíduos
 - Cadeia de reciclagem
 - Modelo de sucateiro
 - Logística reversa
 - Escassez de sucata
 - Obsolescência
 6. Outros temas correlacionados:
 - Linha de financiamento verde
 - Impacto social
 2. Listar os principais desafios da economia circular para o setor do aço brasileiro, assegurando sua competitividade, com base nas tendências descritas acima.

3. Avaliar a relevância para a competitividade do setor de aço no Brasil, de cada dimensão nas etapas da cadeia circular em 2035: Quadro 6 (Inserir uma nota de 1 a 5, sendo 1 menos relevante e 5 mais relevante).

Quadro 7 – Etapas do ciclo do aço × dimensões

Etapas do Ciclo do Aço	Tecnologia	Modelo de Negócio	Regulação
1. Mineração e Refino			
2. Transformação			
3. Projeto e Manufatura de Produtos			
4. Uso dos Produtos			
5. Gestão de Resíduos			

Fonte: Elaborado pela autora.

5. Relacionar os desafios da economia circular trazidos pelos especialistas de cada etapa da cadeia do aço visando a competitividade do setor nas seguintes dimensões de tecnologia, modelos de negócios e regulação.
6. Priorizar ao menos três temas mais relevantes a serem endereçados, a fim de superar os desafios elencados acima. Informar os resultados para seis anos e doze anos (2035).
7. Identificar as boas práticas implementadas pelo setor do aço no Brasil para superar os desafios da sustentabilidade de acordo com as dimensões de tecnologia, modelos de negócios e regulação.
8. Comentários e sugestões adicionais.

ANEXO II: TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Prezado(a) _____,

Esta pesquisa faz parte da dissertação de mestrado *Setor do Aço Brasileiro: Tendências para 2035, Desafios e Boas Práticas de Economia Circular*.

O objetivo da pesquisa é identificar as tendências globais que impactam a geração de valor do setor do aço no Brasil até 2035.

Ao participar de nossa pesquisa, você contribuirá para que este objetivo seja alcançado, por meio do mapeamento das principais tendências de sustentabilidade e dos desafios e impactos relacionados à economia circular da cadeia do aço.

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)

Você está sendo convidado(a) a participar, como voluntário(a), de uma pesquisa científica sobre tendências da economia circular no setor de aço no Brasil.

A pesquisa será realizada por meio de uma entrevista não estruturada, que será realizada presencial ou virtualmente. Estima-se que você precisará de aproximadamente quarenta a sessenta minutos para respondê-la. Em ambos os casos, presencial ou virtualmente, será realizada a gravação do áudio/vídeo para posterior transcrição e análise. A precisão de suas respostas é determinante para a qualidade da pesquisa. Você não será remunerado, visto que sua participação nesta pesquisa é de caráter voluntário.

Os pesquisadores garantem e se comprometem com o sigilo e a confidencialidade de todas as informações fornecidas por você para este estudo. Da mesma forma, reiteramos que os dados coletados serão utilizados apenas para fins da pesquisa. Além disso, reforçamos que o tratamento dos dados coletados seguirá as determinações da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), Lei nº 13.709/2018.

Declaro que li o TCLE, desejo participar da pesquisa e autorizo a gravação do áudio/vídeo, bem como a utilização das minhas respostas e dados disponibilizados, desde que o sigilo e anonimato sejam garantidos.

Local e data

Assinatura

APÊNDICE I: MINIBIOGRAFIA DOS ENTREVISTADOS

Entrevistado 1 (E1)

E1 é formado em engenharia metalúrgica e tem mais de trinta anos de experiência em metalurgia e siderurgia. Além de funções técnicas e gerenciais, exerceu também cargos de diretoria em indústrias siderúrgicas/processamento de aço. Trabalhou com laminação e com processamento de ferro nióbio em aciaria. Também atuou como consultor técnico, principalmente para grupos internacionais de mineração e siderurgia.

Entrevistado 2 (E2)

E2 atuou em siderurgia, iniciando pela área de suprimentos. Acumulou experiência significativa em aquisição de sucatas metálicas e ferro gusa, derivado do minério de ferro. Após a siderurgia, seguiu prestando consultoria para empresas de saneamento.

Entrevistado 3 (E3)

E3 é professor doutor há 28 anos em engenharia metalúrgica por uma das mais importantes universidades da América Latina, com pós-doutorado pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Atua nas áreas de reciclagem, tratamento de resíduos sólidos, desenvolvimento sustentável e metalurgia. É responsável por importantes institutos de ciência e tecnologia nesses mesmos segmentos.

Entrevistado 4 (E4)

E4 é um experiente profissional na área do aço e da sucata. Formado em economia pela Universidade de Mogi das Cruzes, Brás Cubas, defendeu sua tese em 1985, com o título *Cenário e perspectivas para sucata, ferro gusa e ferro esponja, para produções de aço no Brasil*. Tem conhecimentos específicos na geração e gestão de sucata, considerando-se três tipos principais: geração interna, geração industrial e sucata por obsolescência. Também tem experiência com mineração urbana e práticas de separação de sucatas para otimizar a remuneração de materiais, a exemplo da separação de elementos como o cromo para venda a

preços mais altos. Demonstra visão crítica em relação ao modesto aumento da produção de aço no Brasil ao longo dos anos.

Entrevistado 5 (E5)

E5 é engenheiro de materiais e metalurgia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com mais de vinte anos de experiência na área. Passou por cargos executivos em empresas como Aços Villares, Gerdau, Tupy e MWM, respondendo por tecnologias de fundição, pesquisa e desenvolvimento, compras, projetos e pelo setor comercial. Interessa-se por temas como dinâmicas de mercado e práticas de marketing relacionadas com produtos mais tecnológicos.

Entrevistado 6 (E6)

E6 tem quase quarenta anos de experiência no setor de aço, sendo 28 dedicados a uma das maiores siderúrgicas mundiais, onde permanece atuando como executivo de sustentabilidade. Focou em questões ambientais na maior parte de sua carreira, e, a partir de 2000, também começou a se envolver ativamente com assuntos relacionados à pegada de carbono, coordenando projetos de geração de créditos de carbono e atuando no mercado correspondente. Além disso, vem trabalhando com certificações de alto padrão em sustentabilidade, e, mais recentemente, dedicando-se inclusive à incorporação da legislação Corporate Sustainability Reporting Directive (CRSD).

Entrevistado 7 (E7)

E7 é engenheira ambiental, CFA ESG Certificated, com experiência de mais de doze anos. Executiva do setor de fundição/metalurgia, chegou a atuar também no setor químico. Responde hoje pela área de sustentabilidade de um importante grupo no Brasil.

Entrevistado 8 (E8)

Professor doutor há 25 anos por uma das mais importantes universidades da América Latina, E8 é referência acadêmica internacional para o tema materiais/tecnologia da construção e sustentabilidade. Membro de conselhos e centros de inovação brasileiros para construção

sustentável, também promoveu pesquisas em renomados institutos brasileiros e internacionais. É interlocutor das maiores siderúrgicas em operação no Brasil, com as quais discute questões do aço na industrialização da construção civil, na economia circular etc.

Entrevistado 9 (E9)

E9 tem experiência profissional diversificada. É engenheira civil e chegou a trabalhar na área de recursos hídricos nos primeiros cinco anos de sua carreira. Com sua pós-graduação, migrou para a indústria de materiais, na qual assumiu funções em áreas a comercial, a assistência técnica, o marketing de produtos e o desenvolvimento de produtos. Posteriormente, vinculou-se ao lado institucional, trabalhando em uma instituição de materiais de construção, na qual já está há dezessete anos, desde 2006, começou exercendo funções parciais, e, com o passar dos anos, sua dedicação aumentou. Atualmente está na diretoria técnica, onde apoia a coordenação de projetos e ações, além de representar sua entidade em fóruns técnicos do setor, interagindo com o governo e outros participantes da cadeia produtiva da construção.

Entrevistado 10 (E10)

Com mais de trinta anos de experiência em economia da mudança do clima e sustentabilidade, E10 desenvolveu e geriu diversos projetos nessa área, principalmente no que diz respeito a seus aspectos relacionados com finanças e fundos de investimento. Conhecedor de temas como quantificação de emissões e créditos de carbono, atuou ou atua como diretor, conselheiro ou consultor, tanto para empresas como a PwC, CPFL Energia, Paranapanema, Fundação Odebrecht e Infrapar Capital Partners, como para organismos como a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), Banco Interamericano e Banco Mundial (BID).