



CIRCULAR ECONOMY IN THE STEEL BRAZILIAN INDUSTRY: TRENDS AND FUTURE CHALLENGES
ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DO AÇO: TENDÊNCIAS E DESAFIOS PARA O FUTURO

1 Solange Akiama

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo (Brasil).

2 Renata Giovinazzo Spers

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1240-0530>

Corresponding Author:

Solange Akiama

E-mail: syakiama@usp.br

Editora Chefe

Dra. Eliana Severo

Alumni.In Editors - UNICURITIBA

How to cite this article:

Akiama, S., & Spers, R. G. (2024). Economia Circular no setor do aço: Tendências e desafios para o futuro. *Revista Inteligência Competitiva*, 14, e0449.

<https://doi.org/10.24883/IberoamericanIC.v14i.449>

ABSTRACT

Purpose: Examine the role of the circular economy in the steel sector, highlighting trends and challenges faced in its transition to a more sustainable practices.

Methodology/approach: This research is centered on a qualitative analysis of the steel production chain in Brazil. Information was gathered using in-depth interviews and was examined through an abductive approach involving purposive sampling.

Originality/relevance: This study highlights the main trends, examines the challenges, and outlines the best practices within the Brazilian industry steel sector, framed within the context of the circular economy.

Key findings: The results show that Brazil is aligned with global sustainability and circularity trends in the steel industry, albeit with particular challenges.

Theoretical/methodological contributions: The findings of this investigation are intended to establish a basis for mapping out the trends in Brazil's steel industry by 2035.

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

DOI: <https://doi.org/10.24883/IberoamericanIC.v14i.449>

This is an open access article under the terms of the **Creative Commons Attribution** License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



© 2022 The Authors. *Iberoamerican Journal of Competitive Intelligence* published by Alumni.In.



RESUMO

Objetivo: Examinar o papel da economia circular no setor do aço, destacando as tendências e os desafios enfrentados em sua transição para práticas mais sustentáveis.

Metodologia/abordagem: Trata-se de uma investigação qualitativa centrada na cadeia de produção do aço no Brasil. Os dados foram coletados mediante entrevistas em profundidade e analisados a partir de uma abordagem abdução, com amostragem proposital.

Originalidade/relevância: Nesta pesquisa são indicadas as principais tendências, os desafios e as boas práticas do setor siderúrgico brasileiro, tendo em vista o conceito de economia circular.

Principais conclusões: Os resultados mostram que o Brasil está alinhado com as tendências globais de sustentabilidade e de circularidade na cadeia do aço, porém com desafios particulares

Contribuições teóricas/metodológicas: As descobertas desta investigação pretendem servir de fundamento para traçar um panorama das tendências para 2035 no setor do aço no Brasil.

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 de 70,8%. O aço é crucial para a economia global, gerando mais de US\$ 2,5 trilhões em receita e empregando cerca de 6 milhões de pessoas (WSA, 2021). A indústria siderúrgica, no entanto, é altamente competitiva e fragmentada: os dez maiores produtores são responsáveis por apenas 25% da produção global. Os maiores produtores de minério de ferro são países que consomem pouco aço, como Austrália e Brasil, o que cria desafios logísticos para atender às demandas de grandes consumidores, (China, Estados Unidos e Índia).

O aço é utilizado principalmente em edifícios (33%), infraestrutura (22%), máquinas e equipamentos (17%), veículos (15%) e bens de consumo (13%). Sua produção envolve um processo intensivo que utiliza recursos naturais, energia e logística, emitindo muito CO₂: é o maior emissor industrial, com 7% do total de emissões diretas. Em 2018, produziu-se cerca de 1,85 tonelada de CO₂ para cada tonelada de aço (IEA, 2020). Assim, para que as metas de redução das emissões de CO₂ no setor sejam atingidas, 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, numa tendência crescente de incorporar fontes de energia limpas e inovações tecnológicas que permitam produzir aço com menor impacto ambiental.

A siderurgia, de modo geral, utiliza dois insumos metálicos: o minério de ferro e a sucata de aço reciclada. Denomina-se de aço primário aquele que resulta de operações em que o minério de ferro é predominante (no máximo 25% de sucata), e de aço secundário aquele cujo principal componente é a sucata. Respectivamente, ambos respondem por 70% e 30% do aço produzido

atualmente. Na siderurgia primária, o alto-forno é o principal equipamento, e o carvão o principal insumo energético, enquanto na produção secundária, mais sustentável, utiliza-se 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, além da importância das práticas de preservação e da redução do impacto ambiental, é necessário que as indústrias encontrem alternativas para os meios de produção atuais. Disso decorre o interesse deste artigo: a economia circular do aço. Diferentemente da produção linear, que extrai, processa, utiliza e descarta a matéria-prima, na economia circular, ao final do consumo, o aço volta reciclado ao início da cadeia, o que permite não apenas diminuir a extração de matéria-prima, mas reduzir a quantidade de energia empregada no processo produtivo (Pauliuk, Wang, & Müller, 2012).

1.1 Panorama do setor do aço no Brasil

O setor do aço desempenha um papel fundamental na economia, sendo um dos pilares para o desenvolvimento de um país devido a sua vasta aplicação em diferentes indústrias (Instituto Aço Brasil, 2023). Politicamente, há uma crescente pressão 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 em regular e formalizar o setor é um meio de proporcionar maior estabilidade e estimular as empresas a adotarem práticas de inovação sustentável. Há, inclusive, uma pressão governamental progressiva para que se adotem normativas que enfatizem práticas sustentáveis, incluindo a possibilidade de aplicar normas mais rigorosas e incentivar certificações voluntárias.

Socialmente, existe uma pressão crescente por práticas sustentáveis, transcendendo fronteiras legislativas e se tornando uma demanda de clientes internacionais significativos e conscientes. Companhias de renome estão exigindo 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.

Do mesmo modo, iniciativas que ultrapassam as regulamentações vigentes, como certificações voluntárias, indicam uma inclinação à sustentabilidade que emerge de motivações não compulsórias, isto é, não fundamentadas em normativas governamentais, apontando para um movimento social provocado tanto pela pressão das corporações, que enxergam um valor estratégico na sustentabilidade, quanto pelo reconhecimento de que práticas empresariais responsáveis podem ser mecanismos competitivos.

Adicionalmente, políticas públicas para organizar e viabilizar um ambiente de negócios mais estável e previsível no setor siderúrgico são uma condição relevante para fomentar práticas sustentáveis. O governo, ao regulamentar essas políticas, não apenas fornece incentivos para a adesão a tecnologias limpas e eficazes, mas cria um ecossistema propício para atividades como reciclagem e reutilização de materiais, agregando valor à responsabilidade social corporativa e ampliando o engajamento da sociedade em questões ambientais.

Quanto ao aspecto tecnológico, é necessário inovar e adotar tecnologias mais limpas e eficientes. Segundo Bataille et al. (2023), as tecnologias mais recentes para fomentar a produção de aço de baixo carbono são as de redução do uso do ferro diretamente com hidrogênio verde ou azul para utilização em forno elétrico a arco, e tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Há ainda oportunidades para as empresas brasileiras se tornarem líderes em produção

verde, vendendo para mercados desenvolvidos subsidiados e, eventualmente, atendendo a mercados globais e domésticos mais amplos (Nogueira & Madureira, 2022).

O setor do aço no Brasil enfrenta 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. Nesse sentido, em 2023 foi aprovado o Projeto de Lei nº 2148/2015, que regulamenta o mercado de carbono no Brasil, criando 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 uso de carbono em setores como o siderúrgico. Algumas estratégias sugeridas para esse setor incluem aumentar a reciclagem na rota do forno elétrico a arco e substituir o carvão mineral por carvão vegetal na rota do alto-forno. Os cenários de precificação do carbono têm implicações significativas na política energética para implementar contribuições determinadas em nível nacional e para reduzir ou anular as emissões no setor industrial.

Outro dentre os fatores intrinsecamente atrelados à sustentabilidade do setor siderúrgico brasileiro é a economia circular. A reciclagem e a reutilização de sucata de aço são práticas econômicas que reduzem o consumo de energia e a dependência de recursos primários. A formalização e a estruturação do mercado de sucata podem ser impulsionadas por políticas públicas, favorecendo a transição para práticas mais sustentáveis.

Mundialmente, a economia circular tem sido promovida como uma abordagem transversal para atender aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas. 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 brasileiro, que, alinhado com as tendências e dinâmicas globais, deve 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 vista do exposto, neste artigo tencionou-se mapear as tendências para 2035 do setor siderúrgico brasileiro, considerando o arcabouço da economia circular, além de circunscrever as melhores práticas das empresas do setor, bem como identificar seus desafios. Para tanto, esta pesquisa foi concebida como uma investigação qualitativa e nela se utilizou uma amostragem proposital. Assim, serão apresentados os conceitos de economia circular, as tendências, os desafios e as boas práticas segundo especialistas do setor entrevistados para esta pesquisa que atuam nas diversas etapas da cadeia de produção do aço no Brasil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A economia circular é uma redefinição da noção de crescimento, dissociando o desenvolvimento econômico do consumo de recursos naturais (MacArthur & Heading, 2019). Substitui-se o descarte final de resíduos por meio de redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, tornando a reciclagem uma peça-chave para alcançar essa eficiência. Além disso, proporciona também soluções para materiais, aumentando sua vida útil e evitando o descarte, sendo um exemplo de processo de reincorporação de materiais no ciclo produtivo.

A economia circular também recomenda um modelo para “criar e recriar/reutilizar e reaproveitar” recursos e produtos, e a Comissão Europeia (2015) já destacou esse objetivo em seu plano de ação. Busca-se, com isso, melhorar os materiais, limitando o uso de recursos não renováveis e propondo uma grande circulação de resíduos e subprodutos mediante sua reutilização, contribuindo para a sustentabilidade social, econômica e ambiental.

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 visam reduzir o consumo de recursos naturais e o impacto ambiental em toda a cadeia produtiva, em consonância com os preceitos da economia circular (Bocken, Pauw, Bakker, & Van der Grinten, 2016; Branca et al., 2020; Haas, Krausmann, Wiedenhofer, & Heinz, 2015; Instituto Aço Brasil, 2023; Morsetto, 2020; WSA, 2023a). Em suma, estas são as estratégias de circularidade do aço: reduzir, reutilizar, remanufaturar e reciclar. A seguir, será apresentada a descrição das etapas da cadeia produtiva do aço e como elas se relacionam com as estratégias de circularidade.

2.1 Ciclo de produção do aço

Para compreender as tendências da economia circular do setor do aço, é preciso entender as etapas de sua produção, a saber: 1) 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; 2) 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; 3) Produção do aço ou refino: o ferro gusa é processado em altas temperaturas com a adição de outros elementos, como o carbono, para produzir o aço. As altas temperaturas e o uso de energia também contribuem para as emissões de CO₂; 4) Processamento do aço ou fabricação: o aço é transformado em diferentes formatos e tamanhos, como chapas, perfis, barras e tubos. A energia utilizada nessa etapa também contribui para as emissões de CO₂; 5) Manufatura de produtos: o aço é utilizado nas indústrias como matéria-prima para a fabricação de produtos; 6) 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; e 7) 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), apresenta as etapas da cadeia do aço (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 fases 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 até seu descarte nos mercados locais e/ou internacionais. O combustível utilizado pelos veículos durante as movimentações soma-se às emissões de CO₂.

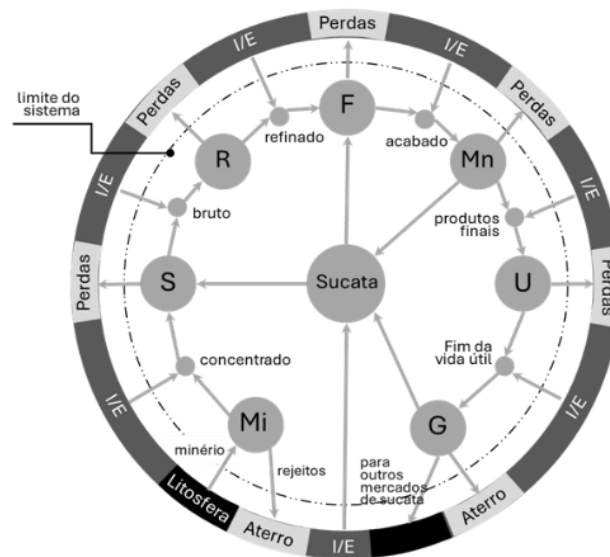


Figura 1. Diagrama circular genérico para metais, com os principais processos.

Fonte: Baseada 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 Sucata nas rotas de produção do aço

As rotas de produção do aço se dividem em primária e secundária. A primária envolve o alto-forno com oxigênio básico e a 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 do aço e as principais tecnologias dessas etapas.

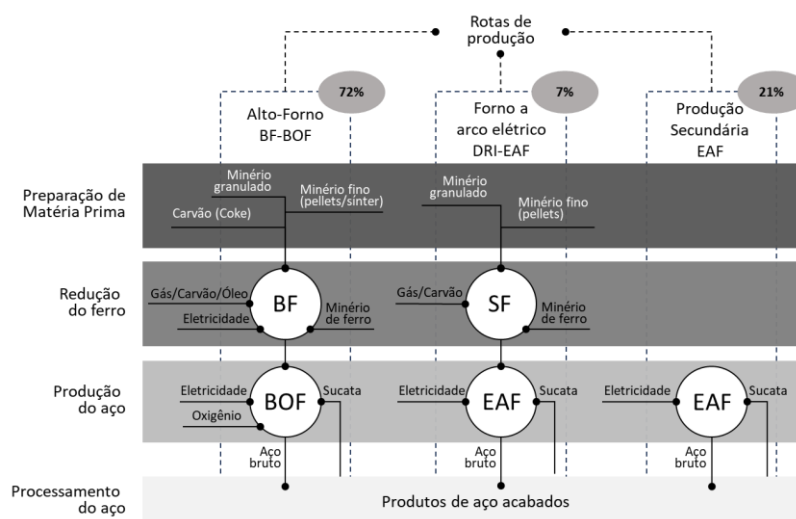


Figura 2. Rotas de produção de aço e as principais tecnologias

Fonte: Lopez, Farfan e Breyer (2022) e WSA (2023a).

Legenda: BF (*Blast Furnace*): Alto-forno; SF (*Shaft Furnace*): Forno de cuba vertical; DRI (*Direct Reduced Iron*): Redução direta; BOF (*Basic Oxygen Furnace*): Forno de oxigênio básico; EAF (*Electric Arc Furnace*): Forno de 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 por uma injeção de jato de oxigênio sobre o ferro gusa, gerando escória. 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 reduzir as emissões de 46 KgCO₂/t de produto e de 0,92 GJ/t de consumo 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 à diminuição do consumo de energia e de emissões de CO₂. Nesse sentido, as soluções tecnológicas avançam em direção à recuperação da 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. Além disso, miniusinas baseadas em reatores de redução direta 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 quase 21% da produção total em 2023 (WSA, 2023). O EAF é a principal alternativa à rota BF-BOF. Nesta, o aço é produzido apenas por meio da fusão de sucata. Sucatas, ferro reduzido diretamente, ferro gusa e aditivos são derretidos por arcos elétricos de alta potência formados entre um cátodo e os ânodos. As graduações de sucata variam em relação a sua composição química e geometria, o que afeta seu preço. Materiais de alta qualidade levam a um consumo reduzido de energia e diminuem a quantidade de escória produzida.

O minério de ferro é abundante em todo o mundo, mas a disponibilidade de sucata é limitada pela taxa de fim de vida dos produtos siderúrgicos e pela eficácia dos sistemas de coleta. Aproximadamente 650 Mt de sucata no mundo 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 por ano e reduz significativamente o uso de outros recursos naturais, como minério de ferro, carvão e calcário. A WSA 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 do aço, na fabricação de produtos de aço e no pós-consumo. A sucata de casa é gerada no processo de produção do aço, quando as siderúrgicas e fundições fabricam novos produtos, raramente saindo da área de produção. 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. Esse material é normalmente vendido para a indústria de metais de sucata, que o processa para vendê-lo para

siderúrgicas e fundições. Representa aproximadamente 23% do total de sucata de aço. Por fim, a sucata pós-consumo resulta de produtos de aço industriais e de consumo que terminaram de cumprir sua vida útil, representando aproximadamente 48% do total (Javaid & Essadigi, 2003).

O aço reciclado não é apenas uma matéria-prima de ferro indispensável para a indústria siderúrgica moderna, mas a única matéria-prima sustentável capaz de substituir o minério de ferro em grande quantidade. A qualidade do aço reciclado afeta a qualidade do aço fundido, tornando necessário classificar e avaliar o aço reciclado antes que entre no forno (Xiao et al., 2023).

Estudo de Fărcean, Proștean e Socalici (2023) sobre o desenvolvimento sustentável do setor de aço permitiu destacar os indicadores mais relacionados com a economia circular: 1) 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 reutilização de materiais; 2) 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; 3) 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; 4) 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; e 5) 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.

2.3 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 indica 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).

Grande parte das emissões de CO₂ da cadeia de produção do aço está associada ao processo de produção do 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 utilizar fontes renováveis de energia.

3 MÉTODO DE PESQUISA

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, 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

abdutiva (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. 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).

Os participantes selecionados eram especialistas com notório saber em áreas de atuação que abrangem as diversas etapas da cadeia do aço no Brasil. Foram convidados por meio de contato pessoal e posterior encaminhamento de alguns especialistas que já haviam participado da pesquisa, sendo, portanto, utilizada a amostragem proposital (Spaulding et al., 2010).

Complementarmente, foram selecionados profissionais com: 1) Formação compatível com sua área de atuação; 2) Experiência mínima de dez anos; 3) Atuação nos setores privado, acadêmico, em entidades setoriais e de regulação; e 4) Exposição internacional. Todas as participações foram totalmente voluntárias e o consentimento informado foi obtido previamente às entrevistas, momento em que foram indicados os objetivos da pesquisa, a metodologia, a confidencialidade e sua autonomia para decidir não responder a qualquer questão ou desistir da investigação, além de ser assinado o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Inicialmente foram realizadas entrevistas em profundidade exploratórias com quatro participantes. 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.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Mapear as tendências do setor do aço, 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. Conforme, Rech e Maciel (2015), os estudos de tendências permitem, por meio de uma reflexão coletiva dos futuros desafios, estruturar e avaliar suas opções estratégicas e mercadológicas, com vistas a orientar as ações de interesses estratégicos nacionais, a geração de políticas tecnológicas em segmentos específicos e 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).

4.1 Tendências na cadeia de valor do aço

Na etapa de mineração e refino, as principais tendências 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 mineração isso significa reaproveitar recursos limitados de rejeitos do processo, como o minério de ferro (Carmignano et al., 2021; Yuan, Zhang, Yin, & Li, 2021), enquanto no refino implica otimizar a utilização de sucata nas rotas primárias e secundárias. A produção secundária de aço emprega energias renováveis em

fornos elétricos a arco, ao passo que a produção primária ainda depende de combustíveis fósseis (IRENA, 2023). O uso de hidrogênio renovável para reduzir o minério de ferro é uma alternativa que possibilita produzir aço primário com quase zero emissão de carbono.

A inovação tecnológica também é uma forte tendência para a circularidade do aço, sendo crucial para que se possa separar com eficiência os materiais de valor das outras matérias. Além disso, observa-se uma tendência em políticas e na ciência para promover o uso de tecnologias eficientes em recursos, tanto para aumentar a segurança dos materiais e energia como para minimizar o impacto ambiental (IEA, 2021; Munaro, Tavares, & Bragança, 2020).

Ademais, em matéria de inovação tecnológica, estas são algumas iniciativas em andamento, segundo Lopez et al. (2022): 1) Oportunidades de biomassa na siderurgia; 2) Produção e armazenamento de hidrogênio; 3) Inovação tecnológica para a indústria siderúrgica; 4) Integração de energias renováveis na indústria siderúrgica; e 5) Potencial global de amônia verde e de captura e utilização de carbono.

Outra linha de força para a cadeia circular e o aproveitamento dos materiais está relacionada com sua eficiência para a desmaterialização e com o desempenho tecnológico das etapas de ligas e produção de aço. 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 e 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.

Desta feita, as principais tendências quanto ao 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. Nesse sentido, Allwood et al. (2013) descrevem as estratégias de circularidade do aço identificadas como tendências pela IRENA (2023) e pela IEA (2020): 1) Reutilização do aço; 2) Eficiência de recursos; 3) Eficiência econômica; 4) Extensão da vida útil; e 5) Uso mais intensivo. Em especial, destaca-se a importância de implementar 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.

4.2 Desafios na implementação da economia circular

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, 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 menos 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 substitua totalmente a produção BF-BOF nos mercados globais (Carvalho, 2024).

Segundo Lopez et al. (2022), a transição para uma indústria siderúrgica desfossilizada exige uma demanda significativa por eletricidade renovável de baixo custo e a utilização de hidrogênio verde. Dentre as tecnologias viáveis para passar dos combustíveis fósseis para as tecnologias baseadas na eletricidade, destacam-se: redução direta de hidrogênio (H_2 DR), que propõe a utilização do hidrogênio como agente redutor, o que pode reduzir as emissões de CO_2

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.

Outra barreira para as práticas de economia circular está relacionada com o design dos produtos, já que a expansão do conjunto de materiais à disposição dos designers dificultou 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 preciso aprimorar o desenvolvimento e projeto de produtos para facilitar a desmontagem, além de considerar o potencial reúso de aço no final da vida útil para outras aplicações com mínimo de processamento.

No que se refere às questões regulatórias que afetam a transição para um modelo circular, 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. 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.

A relevância do papel das instituições e do comércio internacional foi estudada por Graedel et al. (2019), que concluem que é necessário mais refinamento no papel das instituições e do comércio internacional quanto ao conceito de economia circular. Compromissos devem ser equilibrados com os esforços individuais das empresas por lucratividade e capacidade de produção. 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.

Por fim, um último entrave se refere aos modelos tradicionais de negócios e à necessidade de inovação. 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. Incluem melhorias operacionais e 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.

Além disso, segundo Munaro et al. (2020), especificamente para a construção civil, um dos setores que mais utiliza aço, os desafios para a economia circular do aço 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 desenvolver materiais e sistemas de construção que permitam um ciclo de vida mais longo, bem como revitalizar o aço utilizado e promover 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.

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).

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 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).

Esses temas também foram abordados em entrevistas realizadas com especialistas do setor para esta pesquisa. Eles indicaram os temas que estão na ordem do dia da realidade brasileira do setor do aço. Assim, os entrevistados indicaram, com relação à tecnologia, que as etapas mais relevantes são as de mineração e refino e de transformação. A indústria siderúrgica nacional enfrenta o desafio de desenvolver e implementar tecnologias menos agressivas ao meio ambiente e 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.

Quanto ao modelo de negócio, os pontos mais relevantes são as etapas de gestão de resíduos e de uso de produtos. 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.

Por fim, para a dimensão de regulação no Brasil, o desafio mais relevante é a etapa de gestão de resíduos, seguida do 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. 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.

4.3 Oportunidades e melhores práticas

As boas práticas para a indústria do aço 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. A tecnologia, o modelo de negócios e a regulação são fundamentais para promover maior uso de resíduos e aumentar a circularidade do setor de aço.

Além disso, a cooperação e a coordenação global para promover políticas regulatórias sustentáveis são vistas como metas alcançáveis, 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.

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.

4.3.1 Tecnologia

A reciclagem de sucata na produção de aço é amplamente reconhecida como uma prática sustentável e vantajosa, para a qual há uma expectativa de avanço tecnológico completo até 2035, facilitando a produção de aço de forma mais sustentável. Ademais, 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, enquanto o Sistema de Informação do Desempenho da Construção (Sidac) 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).

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 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. Uma amostra da evolução desse setor pode ser observada no *roadmap* publicado pela Aliança para a Construção Modular em 2024 (ABCM, 2024).

Já existem práticas de aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para utilização como combustível nos fornos. Essa prática pode ser uma precursora de tendências para a indústria do aço, visando a redução de emissões e melhor aproveitamento de resíduos.

Com relação à mineração de ferro, a reutilização de materiais de mineração é uma das boas práticas, como em barragens desativadas que contêm materiais de qualidade superior aos que estão sendo prospectados atualmente, objetivando reintegrá-los no ciclo produtivo.

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

Por fim, 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.

4.3.2 Modelo de negócio

A mineração urbana é uma tendência que ganha destaque: 35% da produção de aço no Brasil provém da reciclagem de sucata, epitomizando o conceito de economia circular na indústria. Outra boa prática de investimento em pesquisa e desenvolvimento de projetos de inovação em mineração urbana pode ser exemplificada com as seguintes empresas: Tupy, BMW Group Brasil, Senai Paraná e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Elas desenvolvem um projeto que contempla a reciclagem de baterias de veículos elétricos por meio da recuperação de compostos químicos de baterias por hidrometalurgia, processo mais sustentável. 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.

Por fim, o mercado de sucata se direciona cada vez mais para a sustentabilidade, e reconhece a importância do aço nesse contexto. 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 de benefícios como o financiamento verde e o aumento da demanda por construções sustentáveis, que incluem o uso de aço proveniente da reciclagem.

4.3.3 Regulação

Um dos exemplos envolvendo boas práticas relacionadas à regulação do setor do aço é atuação na gestão de resíduos de uma das maiores empresas da indústria do aço, que está 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 positiva. Empresas do setor da cadeia estão tomando medidas de destinação adequada de resíduos, separando os que podem ser nocivos dos que não são contaminantes e que podem ser adequadamente reaproveitados, como o resíduo de cobre.

Além disso, outra boa prática 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 apresentadas 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. As boas práticas indicam que existem ações de diversos atores da cadeia já em andamento para que o setor do 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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foram mapeadas as principais tendências para o setor do aço, a saber: 1) a economia circular como um novo paradigma para o setor siderúrgico; 2) o desenvolvimento tecnológico, em especial as energias renováveis; 3) a consolidação da gestão de resíduos como parte indispensável da cadeia do aço; e 4) a necessidade de incentivos e de regulação de práticas sustentáveis para favorecer uma transição para um cenário de baixas emissões de carbono. Adicionalmente, foram circunscritos 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.

Tendo em vista o horizonte de 2035, as principais tendências para no setor do aço no Brasil, com foco na economia circular, são:

Redução de emissões: 1) Adoção de tecnologias orientadas para a redução de emissões, com foco nas rotas de produção de aço primárias e secundárias, que apresentam as maiores emissões na cadeia produtiva; 2) Uso inovador de hidrogênio renovável na redução do minério de ferro, representando um caminho viável para produzir aço primário com emissões mínimas; 3) Aproveitamento de alto-forno a carvão vegetal como uma alternativa não fóssil e sustentável que destaca o Brasil no caminho da inovação; e 4) Incremento no uso de sucata para reduzir a temperatura do forno na produção de aço e como estratégia para aumentar a porcentagem de reciclagem, visando reduzir emissões mediante melhorias tecnológicas.

Gestão de resíduos: 1) Tendência ao reaproveitamento de resíduos como minério de ferro e materiais anteriormente considerados de menor valor; 2) Aumento da recuperação do aço a partir de escórias de processos anteriores; 3) Uso crescente de materiais recicláveis na produção do aço e estimulação da produção interna de sucata, buscando reduzir a dependência de importações; 4) Manutenção do modelo de negócio dos sucateiros no Brasil, evitando a formação de players muito poderosos no mercado; e 5) Escassez da sucata

Regulação: 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; 3) Apreciação da necessidade de adaptação às políticas de sustentabilidade para evitar futuros impactos nos preços e na demanda por aço e sucata; e 4) Utilização de políticas públicas para promover a reciclagem nos diversos setores e 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 na eficiência para se manter competitiva diante das exigências de um mercado global preocupado com as questões ambientais.

O Brasil está alinhado 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, está na fase-piloto, com apoio financeiro do governo para fomentar tecnologias de baixa emissão. No Brasil, por sua vez, destaca-se a adoção de hidrogênio renovável e carvão vegetal não fóssil no processo 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.

Pesquisas futuras poderiam propor um *roadmap* para o Brasil, que 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 desenvolver 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 é indicado 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.

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 apoiam o avanço tecnológico e sustentável no Brasil e contribuem para os esforços globais de redução de emissões decorrentes das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABCM. (2024). *Roadmap Brasil da construção modular*. <https://bit.ly/3W9hduL>

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. <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*. BNDES.

- 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. <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2187750>
- 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. <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). <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. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>
- Carvalho, D. (2024, 30 de Janeiro). What's next for green steelmaking technologies? *Woodmackenzie*. <https://bit.ly/4d8MfJ4>
- Cavaliere, P. (2019). *Clean ironmaking and steelmaking processes: Efficient technologies for greenhouse emissions abatement*. Springer.
- 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.
- Dragt, E. (2017). *How to research trends: Move beyond trend watching to kickstart innovation*. Laurence King Publishing.
- Fărcean, I., Proștean, G., & Socalici, A. (2023). Sustainable development indicators in the steel industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 2540(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2540/1/012045>
- Graedel, T. E., Reck, B. K., Ciacci, L., & Passarini, F. (2019). On the spatial dimension of the circular economy. *Resources*, 8(1). <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. <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. <https://doi.org/10.1111/joms.12543>
- IEA. (2020). *Iron and steel technology roadmap*. <https://bit.ly/446QWz8>
- Instituto Aço Brasil. (2023). *Aço & sustentabilidade 2023*. <https://bit.ly/3xICj99>
- IRENA. (2023). *Towards a circular steel industry*. <https://bit.ly/3U6uRMr>
- Javaid, A., & Essadiqi, E. (2003). Final report on scrap management, sorting and classification of steel. *Natural Resources Canada*, 23, 1-22. <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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.056>
- 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. <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.
- 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. <https://doi.org/10.1111/corg.12006>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- 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. <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). <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38241>
- 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. <https://doi.org/10.1021/es201904c>
- 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., 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. <https://doi.org/10.1021/es072108l>
- Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, 337(6095), 690-695. <https://doi.org/10.1126/science.1217501>
- 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. <https://doi.org/10.1177/1098300708329011>
- 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>
- 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). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>
- WSA. (2021). *Climate change and the production of iron and steel*. <https://bit.ly/4b6k4sD>
- WSA. (2023a). *Circular economy/steel: The permanent material in the circular economy*. <https://worldsteel.org/circular-economy/>
- WSA. (2023b). *Sustainability indicators 2023 report*. <https://bit.ly/3QaJMEj>
- WSA. (2023c). *World Steel in Figures 2023*. <https://bit.ly/4b3aWEX>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163032>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124067>