

REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS NA CADEIA DE VALOR DO MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE SUSTENTABILIDADE, INOVAÇÃO E ECONOMIA CIRCULAR

Fabiana Fogaça Valim De Camargo Egawa - FGV EAESP

Leandra Cristina Piscor - FGV EAESP

Resumo

O setor de mineração, estratégico para a economia brasileira, enfrenta crescente pressão por práticas sustentáveis diante dos impactos socioambientais de suas operações. Entre os desafios, destaca-se o volume expressivo de rejeitos gerados no beneficiamento do minério de ferro, tradicionalmente armazenados em barragens, com riscos associados. Considerando os princípios da economia circular, este estudo analisa como o reaproveitamento desses rejeitos pode viabilizar novos modelos circulares na cadeia de valor do setor minerador. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada na análise de conteúdo documental de relatórios de sustentabilidade e documentos institucionais das três maiores mineradoras de minério de ferro atuantes no Brasil: Vale S.A., Anglo American e CSN Mineração. Os resultados apontam para iniciativas que revalorizam resíduos como insumos industriais, substituem matérias-primas virgens e reduzem passivos ambientais. No entanto, ainda persistem barreiras regulatórias, tecnológicas e mercadológicas. Conclui-se que a adoção de modelos circulares na mineração requer não apenas inovação técnica, mas também articulação institucional e incentivos para que a circularidade se consolide como vetor estratégico de sustentabilidade.

Palavras-chave: Economia Circular, Mineração Sustentável, Cadeia de Valor da Mineração.**Abstract**

The mining sector, a strategic pillar of the Brazilian economy, is under increasing pressure to adopt sustainable practices in light of the socio-environmental impacts of its operations. One of the key challenges is the large volume of tailings generated during iron ore beneficiation, which are traditionally stored in dams, posing significant risks. Aligned with the principles of the circular economy, this study examines how the reuse of these tailings can enable new circular models within the mining value chain. The research employs a qualitative and exploratory approach, based on documentary content analysis of sustainability reports and institutional documents from the three largest iron ore mining companies operating in Brazil: Vale S.A., Anglo American, and CSN Mineração. The findings reveal initiatives that revalue waste as industrial inputs, replace virgin raw materials, and reduce environmental liabilities. Nevertheless, regulatory, technological, and market barriers remain. The study concludes that the adoption of circular models in mining requires not only technical innovation but also institutional coordination and appropriate incentives for circularity to become a strategic driver of sustainability.

Keywords: Circular Economy; Mining sustainability; Mining Value chain.

REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS NA CADEIA DE VALOR DO MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO SOBRE SUSTENTABILIDADE, INOVAÇÃO E ECONOMIA CIRCULAR

1. Introdução

O setor de mineração desempenha um papel estratégico na economia brasileira, respondendo por cerca de 47% do saldo da balança comercial no ano de 2024 (IBRAM, 2025). O país está entre os cinco maiores produtores de minerais do mundo, com destaque para o nióbio, do qual é o maior produtor global, e para o minério de ferro, ocupando a segunda posição mundial (KPMG, 2023).

O minério de ferro é a principal matéria-prima para a produção de aço, insumo essencial em diversas cadeias produtivas, da construção civil à indústria automotiva, desempenhando papel central na geração de valor industrial e no crescimento econômico. Contudo, a sustentabilidade dessa atividade requer atenção, dada a sua natureza extrativa e os impactos ambientais e sociais ao longo de todo o ciclo de vida da mina, desde a exploração até o fechamento (Shrivastava e Vidhi, 2020).

Nesse cenário, os princípios da economia circular têm ganhado destaque como resposta aos desafios socioambientais da mineração. Entre as estratégias emergentes, está o reaproveitamento de rejeitos e estéreis, materiais descartados após a lavra, que ainda contêm minério de ferro em proporções tecnicamente viáveis, possibilitando a redução da necessidade de novas extrações e o uso mais eficiente dos recursos naturais (Brazil Journal, 2024).

Mineradoras com atuação no Brasil têm desenvolvido iniciativas voltadas à revalorização de rejeitos e estéreis de minério de ferro, incluindo práticas de reprocessamento, coprodução e incorporação de resíduos em outras cadeias produtivas. A Vale S.A., Anglo American e CSN Mineração, as três maiores empresas de minério de ferro atuantes no país (Brazil Mineral, 2024), vêm promovendo soluções inovadoras, como a filtragem e o empilhamento a seco de rejeitos, a produção de areia sustentável, blocos de pavimentação e a reintrodução de material residual no próprio ciclo produtivo, sinalizando uma transição gradual do modelo linear para modelos circulares.

A Vale S.A., principal mineradora do país e maior produtora global de minério de ferro, lidera iniciativas nessa frente. A companhia estima que, até 2030, 10% de sua produção de minério de ferro no país possa ser proveniente de fontes circulares.

2. Problema de Pesquisa e Objetivo

Dada a importância econômica e ambiental do minério de ferro, os altos volumes de rejeitos gerados durante seu beneficiamento impõem desafios estruturais à sustentabilidade do setor. Tradicionalmente armazenados em barragens, esses resíduos representam riscos à integridade ambiental e à segurança de comunidades, como evidenciado por desastres recentes, como o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), em 2015, e o desastre de Brumadinho (MG), em 2019.

Em resposta às crescentes pressões sociais, regulatórias e ambientais, diversas mineradoras têm buscado alternativas sustentáveis alinhadas aos princípios da economia circular. A cadeia do minério de ferro é intensiva no uso de recursos naturais, como o consumo de grandes volumes de água e energia, e emissões de gases de efeito estufa (GEE), exigindo

soluções inovadoras que prolonguem o ciclo de vida dos materiais e promovam a revalorização de resíduos.

Diante desse cenário, este estudo busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: “Como o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro pode viabilizar novos modelos circulares no setor de mineração brasileiro?”

Para responder a essa questão, foi realizada uma análise qualitativa e de natureza exploratória, fundamentada na revisão de literatura e na avaliação de dados secundários extraídos de relatórios de sustentabilidade e documentos corporativos de mineradoras atuantes no Brasil. O objetivo é compreender como as práticas atuais de reaproveitamento de rejeitos contribuem para o desenvolvimento de modelos circulares completos e quais são os seus impactos potenciais sobre a sustentabilidade da cadeia de valor a montante do minério de ferro.

3. Fundamentação Teórica

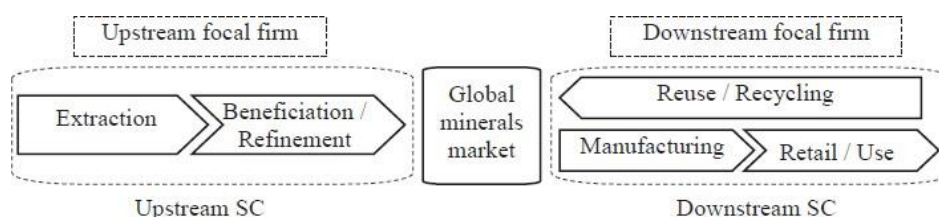
3.1 Sustentabilidade e Inovação no Setor Minerador

Elkington (1997) introduziu o conceito de *Triple Bottom Line* (TBL), segundo o qual a sustentabilidade corporativa deve considerar, de forma equilibrada, três dimensões interdependentes: ambiental, social e econômica. Desde então, esse conceito tem sido amplamente utilizado como referência para a formulação de estratégias empresariais sustentáveis. Revisões mais recentes desse arcabouço enfatizam a importância de incorporar essas dimensões de forma integrada na cadeia de valor das organizações, especialmente nas cadeias de suprimentos, onde as interdependências entre impactos e *stakeholders* são mais evidentes (Slaper e Hall, 2011).

Nesse contexto, o setor de mineração tem sido particularmente pressionado a adaptar suas práticas, em virtude da intensificação das exigências regulatórias, do escrutínio social e da relevância dos impactos socioambientais associados à sua atividade. Shrivastava e Vidhi (2020), em estudo de caso com as empresas Alcoa e Rio Tinto, demonstraram que a sustentabilidade tem sido incorporada de forma mais central nas estratégias corporativas, ultrapassando o caráter meramente normativo.

Avançando nesse debate, Sauer e Seuring (2017) exploram a interseção entre sustentabilidade e gestão da cadeia de valor de minerais, evidenciando uma lacuna na literatura, em que os estágios iniciais da cadeia, conhecidos como cadeia a montante (*upstream*), que englobam atividades como extração, beneficiamento, transporte e comercialização, tendem a ser negligenciados em comparação às etapas a jusante (*downstream*), voltadas à transformação do minério em produtos finais ou semiacabados, incluindo varejo, reciclagem e descarte.

Diante dessa lacuna, este estudo concentra sua análise na etapa a montante, com ênfase nas práticas de economia circular aplicadas a esse segmento, conforme representado na Figura 1 (Cadeia de valor minerais):



Fonte: Sauer e Seuring (2017)

Os desafios de sustentabilidade na cadeia a montante (*upstream*) incluem violações de direitos humanos, financiamento de conflitos e condições precárias de trabalho e saúde, além de impactos ambientais, como desmatamento, perda de biodiversidade e poluição, e gestão inadequada de resíduos. Esses desafios são agravados por problemas de governança, riscos políticos, baixos teores minerais e a necessidade de tecnologias e investimentos (Sauer e Seuring, 2017).

Na cadeia a jusante (*downstream*), os desafios concentram-se na reciclagem e na economia circular, na necessidade de tecnologias avançadas e na maior integração de materiais reciclados, bem como na dificuldade de estimular a demanda por minerais sustentáveis devido à baixa conscientização do consumidor e à dificuldade em estabelecer mercados. Problemas de consumo excessivo, incluindo o *design* de produtos ineficientes que dificultam a reutilização e a reciclagem, também são observados. Ao longo de toda a cadeia, a falta de rastreabilidade e transparência dificulta o monitoramento da origem dos minerais e a garantia de práticas sustentáveis, enquanto a fragmentação entre os atores e a volatilidade dos preços minerais comprometem os investimentos em sustentabilidade (Sauer e Seuring, 2017).

Por fim, Sauer e Seuring (2017) argumentam que a gestão sustentável da cadeia de valor de minerais requer colaboração interorganizacional, inovação e governança para lidar com impactos socioambientais.

Wong e Ngai (2019) destacam que a inovação em cadeias de suprimentos envolve novas tecnologias e processos que aumentam a rastreabilidade, respondem à variabilidade na demanda e incorporam sustentabilidade como critério estratégico. Por sua vez, Van der Vorst et al. (2002) argumentam que o redesenho da cadeia, orientado pela identificação de incertezas, como as geradas pelo reaproveitamento de rejeitos, é um passo necessário para integrar fluxos reversos e sistemas circulares em cadeias complexas.

Nesse contexto, a inovação configura-se como uma aliada estratégica na promoção por sustentabilidade no setor minerador, sobretudo por meio de desenvolvimento de soluções tecnológicas que reduzem os impactos socioambientais. Um exemplo disso se refere ao empilhamento a seco de rejeitos filtrados, que representa uma mudança de paradigma na gestão de rejeitos. Essa tecnologia viabilizada por equipamentos avançados de desaguamento e filtragem, permite recuperar até 90% da água utilizada no processo, além de eliminar a necessidade de barragens convencionais, mitigando riscos socioambientais. Cacciuttolo e Atencio (2023) destacam que o comprometimento estratégico das mineradoras com a inovação e a sustentabilidade é fundamental para viabilizar essa transição tecnológica, permitindo maior controle operacional e a redução de incertezas, e o abandono de práticas obsoletas.

3.2 Economia Circular no Setor Minerador

O conceito de economia circular, conforme delineado por Kirchherr et al. (2017), propõe uma mudança sistêmica de modelo, substituindo a lógica linear de extrair-produzir-descartar, por ciclos fechados de materiais. A economia circular deve ser compreendida como um modelo regenerativo e restaurativo por intenção e *design*, indo além da simples reciclagem ou eficiência incremental. Em setores extrativos, a circularidade plena é limitada pela finitude dos recursos, mas pode ser viabilizada por estratégias de reaproveitamento, reprocessamento e reciclagem (Korhonen et al., 2018).

Apesar de amplamente difundido, o conceito de economia circular ainda carece de uniformidade conceitual na literatura e na prática, sendo por vezes confundido com iniciativas sustentáveis genéricas ou de caráter apenas incremental. Para superar essa ambiguidade, Nobres e Tavares (2021) propuseram uma definição integrada, na qual a economia circular é compreendida como um sistema econômico orientado à eliminação de resíduos e poluição ao

longo de todo o ciclo de vida dos materiais, da extração ao consumo, garantindo sua reintegração segura e regenerativa em processos industriais ou nos ecossistemas naturais.

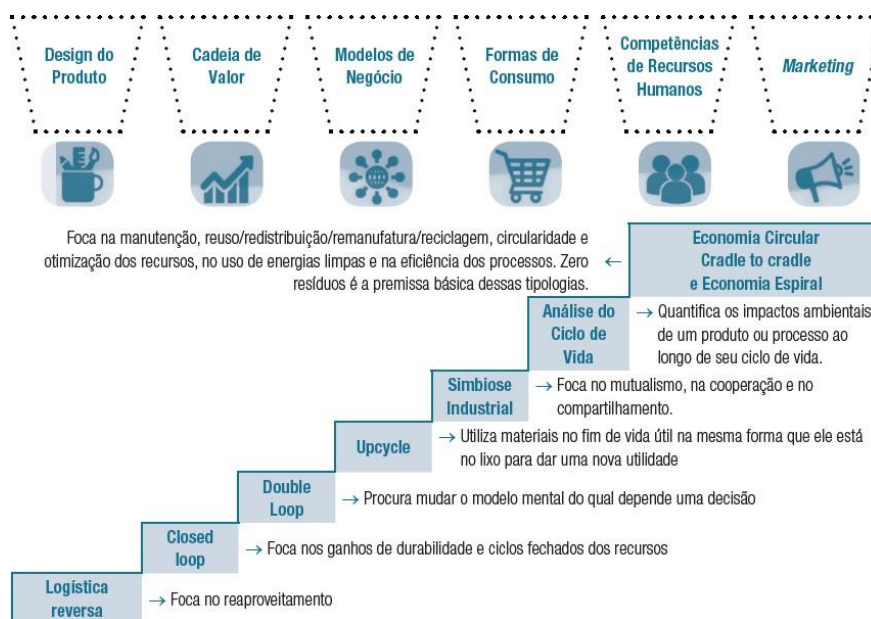
Além disso, Nobres e Tavares (2021) ressaltam que a economia circular deve ser concebida como um modelo sistêmico, cuja implementação ocorra de forma integrada em três níveis interdependentes, sendo o macro, que envolve políticas públicas e sistemas globais, o meso relacionado a cadeias produtivas e setores industriais e o micro, no âmbito de empresas e consumidores. A atuação coordenada entre esses níveis é essencial para que se alcance o equilíbrio entre objetivos ambientais, sociais e econômicos, conforme preconizado pelas abordagens contemporâneas de sustentabilidade.

A economia circular contempla diferentes formas de prolongar o uso dos recursos, sendo o *open-loop* uma das abordagens e nessa configuração, os resíduos ou subprodutos de uma cadeia produtiva são redirecionados como insumos para outras cadeias distintas, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais e mitigando impactos ambientais (Kirchherr et al., 2017; Geissdoerfer et al., 2017). Essa prática, também conhecida como *downcycling*, pode acarretar perda de valor material ou funcionalidade original, mas ainda assim contribui para a circularidade ao evitar o descarte e fomentar a simbiose industrial entre setores (Bocken et al., 2016).

Por outro lado, os sistemas *closed-loop* representam um modelo mais completo de circularidade, no qual os materiais recuperados são reinseridos na própria cadeia produtiva de origem, substituindo matérias-primas virgens e criando um ciclo regenerativo completo (Guide e Van Wassenhove, 2009). Esse modelo requer investimentos em logística reversa, reprocessamento e design de produtos voltados à remanufatura ou à reutilização de componentes, o que torna sua implementação mais complexa, porém mais alinhada aos princípios de circularidade plena. Nas cadeias de suprimentos sustentáveis, a integração entre fluxos logísticos diretos e reversos permite capturar valor residual e reduzir externalidades ambientais, fortalecendo a resiliência e eficiência sistêmica (Genovese et al., 2017).

Na pesquisa feita por Sehnem e Pereira (2019), as autoras apresentam um *framework* que busca organizar e esclarecer as principais abordagens relacionadas à economia circular. O modelo parte de práticas operacionais consolidadas, como a logística reversa, voltada ao retorno e reaproveitamento de materiais pós-consumo, e os ciclos fechados de produção, que visam estender a vida útil de produtos e materiais dentro da cadeia produtiva. Em seguida, aparecem conceitos que envolvem mudanças no pensamento organizacional, como o aprendizado em ciclo duplo (*double loop*), que estimula a revisão de pressupostos na tomada de decisão, e o *upcycle*, que transforma resíduos em novos produtos com valor agregado, sem a degradação dos materiais.

Sehnem e Pereira (2019) também incorporam no *framework* abordagens como a simbiose industrial, que promove o intercâmbio de recursos entre organizações para benefício mútuo, e a análise do ciclo de vida, que permite mensurar os impactos ambientais ao longo da existência de um produto. No topo da estrutura estão os conceitos amplos de economia circular, *cradle to cradle* e economia espiral, que integram princípios de circularidade plena, uso eficiente de recursos e inovação no *design*. Essas abordagens abrangem aspectos técnicos, econômicos e ambientais, além de envolver áreas estratégicas das organizações, como *design* de produto, modelos de negócio, consumo, recursos humanos e *marketing*, reforçando o objetivo de eliminar a geração de resíduos e ampliar a sustentabilidade nos processos produtivos, conforme pode ser visto na Figura 2 (interfaces entre os conceitos que representam a economia circular) abaixo:



Fonte: Sehnem e Pereira (2019)

Quando envolve a aplicação de economia circular no setor minerador, esta apresenta limitações, segundo Palacios e Rodríguez (2022), a mineração, por conta da sua natureza, envolve um processo de transferência intensiva de materiais, no qual a obtenção de pequenas quantidades de metal requer o deslocamento de grandes volumes de rochas e minerais sem valor econômico. Ou seja, isso gera uma grande quantidade de resíduos em que a reutilização nem sempre é viável, seja do ponto de vista técnico, seja do ponto de vista econômico.

Ainda segundo os autores Palacios e Rodríguez (2022), a adoção de prática de reaproveitamento de resíduos ou de reprocessamento de rejeitos não deve ser automaticamente interpretada como economia circular ou sustentabilidade, uma vez que, pode implicar em custos energéticos elevados, consumo adicional de água e emissões de carbono, que podem anular ou até mesmo superar os benefícios esperados. Sendo assim, os autores argumentam que deve haver uma análise do ciclo de vida completo, que permita mensurar os *trade-offs* envolvidos, e para que o reaproveitamento seja ambientalmente, economicamente e socialmente mais eficientes, para não comprometer a legitimidade da economia circular.

Segundo Upadhyay et al. (2021), a adoção dos princípios da economia circular na indústria da mineração ainda se mostra incipiente. Isso porque na pesquisa foi realizado a análise de conteúdo dos relatórios de sustentabilidade das empresas Anglo American, BHP e Rio Tinto e se evidenciou que o uso explícito do termo "economia circular" é quase inexistente, restringindo-se a raras menções após 2016. No entanto, identificou-se uma adoção mais frequente de práticas associadas à circularidade, como a reciclagem, principalmente de água e materiais operacionais, ainda que sem evidência de evolução sistemática ou compromisso estratégico consolidado.

Para Upadhyay et al. (2021), essa lacuna entre discurso e prática revela obstáculos para a incorporação efetiva da economia circular no setor. Embora as práticas relacionadas à reciclagem sejam relatadas, elas ainda não resultam em mudanças significativas nos indicadores de desempenho ambiental das companhias. Os autores argumentam que a economia circular permanece confinada ao nível operacional e não se tornou parte integrante da governança corporativa ou das estratégias de longo prazo das mineradoras, indicando que avanços dependem de gatilhos como regulação ambiental mais rígida, pressões sociais e oportunidades de inovação tecnológica.

Tayebi-Khorami et al. (2019) destacam que a transformação dos rejeitos de mineração em insumos reutilizáveis exige a superação de barreiras regulatórias, técnicas e sociais que ainda limitam a adoção de práticas sustentáveis no setor. Essa transição envolve um conjunto de iniciativas interdependentes, como o reprocessamento de rejeitos, o reaproveitamento de rochas estéreis, a aplicação de tecnologias geometalúrgicas para previsão e controle de resíduos, bem como o desenvolvimento de novos produtos com base nesses materiais. Contudo, a efetivação dessas soluções depende da articulação entre diferentes dimensões: a inovação tecnológica deve estar alinhada à viabilidade econômica, à existência de um arcabouço jurídico adequado e à aceitação social dos produtos derivados de resíduos minerais. Deste modo, é indispensável uma abordagem multidisciplinar e integrada, que conecte os aspectos técnicos, normativos e socioambientais, para que essas estratégias se tornem viáveis e gerem valor de forma sustentável ao longo de todo o ciclo de vida da mineração.

4. Metodologia

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa de natureza exploratória, fundamentada na técnica de análise de conteúdo documental, com o objetivo de compreender como o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro no Brasil pode viabilizar novos modelos circulares no setor minerador, à luz dos princípios da economia circular.

A coleta de dados foi realizada por meio da análise sistemática de relatórios públicos de sustentabilidade, relatórios integrados que consolidam informações financeiras e socioambientais, documentos institucionais e materiais corporativos relacionados à economia circular e à gestão de rejeitos. Esses dados foram obtidos a partir dos websites institucionais das três maiores mineradoras de minério de ferro atuantes no Brasil: Vale S.A., Anglo American Minério de Ferro Brasil e CSN Mineração. A coleta foi realizada em junho de 2025, priorizando as versões mais recentes dos relatórios disponíveis, que são os do ano de 2024.

A análise dos documentos seguiu os procedimentos da Análise de Conteúdo proposta por Bardin (2011), permitindo a identificação e sistematização de informações relevantes para os objetivos do estudo. As categorias de análise foram definidas com base na literatura sobre economia circular, e sustentabilidade e inovação em cadeias minerais, e contemplaram aspectos como práticas de reaproveitamento de rejeitos e modelos de circularidade adotados.

A escolha por utilizar documentos corporativos se fundamenta na riqueza e atualidade das informações que essas empresas disponibilizam sobre suas práticas ambientais, estratégias de inovação e resultados alcançados (Upadhyay et al., 2021). Além disso, essa abordagem permite analisar de forma sistemática as iniciativas em andamento, possibilitando uma visão comparativa entre as empresas e a identificação de tendências no setor.

Como limitação, reconhece-se que os documentos analisados refletem predominantemente a narrativa institucional das empresas, podendo restringir a percepção crítica sobre desafios e contradições. Para mitigar esse viés, os dados foram triangulados com literatura acadêmica e técnica, buscando reforçar a consistência analítica da interpretação dos resultados.

5. Análise de Resultados

5.1. Iniciativas e Modelos de Economia Circular em Mineradoras

5.1.1. Vale S.A

Com base no Relatório Integrado de 2024 da empresa Vale e nas informações disponíveis no site institucional da empresa (consultadas em junho de 2025), as iniciativas e

modelos de economia circular identificados adotam uma abordagem de economia circular que busca superar o modelo linear “extrair, produzir e descartar” (Kirchherr et al., 2017). Em outras palavras, essa abordagem é proposta por meio do redesenho dos produtos e processos para reduzir a geração de resíduos e ampliar a reutilização de materiais ao longo do ciclo de vida.

A mineradora tem um programa chamado de Programa de Mineração Circular - *Waste to Value*, que tem como objetivo ampliar o reaproveitamento de rejeitos e estéréis, otimizar o processamento mineral e promover o desenvolvimento de coprodutos a partir dos fluxos residuais da mineração de ferro. Esse programa estabeleceu a meta de que, até 2035, as operações globais de ferrosos busquem a mineração “zero estéril, zero rejeito e neutra em carbono”.

Ademais, a Vale pretende que, até 2030, 10% de sua produção anual de minério de ferro seja de fontes consideradas circulares. Em 2024, foram produzidas mais de 12 milhões de toneladas de minério de ferro com base em fontes circulares (Vale, 2024). Entre as iniciativas associadas ao Programa de Mineração Circular, existem outros quatro principais projetos voltados diretamente à cadeia do minério de ferro:

- Programa Gelado em Carajás-PA: utiliza tecnologias de concentração magnética para reprocessar rejeitos armazenados em barragens desde o início da operação da mina. A iniciativa prevê a produção de até 80 milhões de toneladas de *pellet feed* com teor de ferro de 63% até 2035. O produto resultante é utilizado na planta pelotizadora da Vale em São Luís (MA), possibilitando ganhos de eficiência para clientes siderúrgicos. O projeto também incorpora equipamentos elétricos alimentados por fontes renováveis, com expectativa de evitar a emissão de mais de 500 mil toneladas de CO₂ ao longo do período de operação.
- Aproveitamento de pilhas de estéril na Mina de Serrinha (MG): após a adquirir a Mina de Serrinha em 2019, foram identificadas pilhas de estéril com teor médio de ferro acima de 50%, e então foi viabilizado o seu reaproveitamento. Estima-se que haverá um aproveitamento de aproximadamente 3 milhões de toneladas de material dessas estruturas até 2026, com cerca de 700 mil toneladas já processadas até 2024. A eliminação das pilhas contribui para a redução de riscos ambientais, como deslizamentos e emissões de poeira, e possibilita a recuperação ambiental das áreas afetadas.
- Fábrica de Blocos da Mina do Pico em Itabiro-MG: essa mina transforma rejeitos de mineração de ferro em produtos pré-moldados para a construção civil, como blocos de vedação e pisos intertravados. A capacidade anual estimada é de reaproveitamento de cerca de 30 mil toneladas de rejeito, com produção de cerca de 3,8 milhões de unidades de blocos.
- Areia Sustentável em Brucutu-MG: a empresa desenvolveu um produto de areia com características técnicas adequadas para a construção civil e processos industriais, a partir do beneficiamento de rejeitos de mineração de ferro. Após sete anos de pesquisa, a produção comercial iniciou em 2021. Em 2023, foi criada a *startup* Agera para dar escala ao negócio, com produção de aproximadamente 800 mil toneladas em 2023 e volume acumulado de 2 milhões de toneladas até o final de 2024. A iniciativa busca reduzir a extração de areia natural e contribuir para a preservação ambiental.

5.1.2. Anglo American

Com base no *Sustainability Report 2024* da empresa Anglo American e nas informações disponíveis no site institucional da empresa (consultadas em junho de 2025), a mineradora integra os princípios da hierarquia de gestão de resíduos (prevenção, redução, reuso, reciclagem, recuperação e transformação) e busca manter produtos e materiais em uso por mais tempo, e de regenerar sistemas naturais.

No Brasil, o seu principal segmento é o minério de ferro por meio do complexo Minas-Rio e a mineradora possui algumas iniciativas voltadas para economia circular. Um dessas iniciativas é o projeto piloto de fabricação de blocos de pavimentação com rejeitos de minério de ferro, ou também conhecidos como “bloquetes”. Esse projeto foi desenvolvido em parceria com as empresas Rei do Bloco e a construtora Terraco (Anglo Sustainability Report 2024, 2025).

Em 2024, cerca de 293 mil blocos foram produzidos e utilizados na pavimentação de vias em Alvorada de Minas, Serro e Conceição do Mato Dentro. A empresa planeja expandir essa iniciativa e obter certificações para os produtos, consolidando como uma solução que transforma um passivo ambiental em insumo para a infraestrutura urbana (Anglo Sustainability Report 2024, 2025).

Outra iniciativa está voltada para construção de uma nova planta de filtragem de rejeitos no Minas-Rio, visando a redução de até 85% do volume de rejeitos úmidos enviados as barragens. Essa tecnologia também permite a recirculação da água (Anglo Sustainability Report 2024, 2025).

A mineradora também conduz estudos sobre a utilização de rejeitos de minério de ferro em aplicações na construção civil e na recuperação ambiental, e o relatório menciona avanços em inovação (como os programas *FutureSmart Mining*TM e *CircuLab*) e colaborações com universidades e governos locais (Anglo American, 2024).

Apesar dessas iniciativas, estas ainda estão em estágios iniciais e concentradas no complexo Minas-Rio, não tendo metas quantitativas ou planos de expansão dessas iniciativas, como por exemplo, na unidade Kumba Iron Ore (África do Sul), que também tem como foco o minério de ferro.

5.1.3. CSN Mineração

Com base no Relatório Integrado de 2024 da empresa CSN Mineração e nas informações disponíveis no site institucional da empresa (consultadas em junho de 2025), as iniciativas envolvem práticas de inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental.

Desde 2020, a CSN realiza a gestão de rejeitos por meio da implementação da filtragem e o empilhamento a seco de rejeitos em larga escala, eliminando a dependência de barragens convencionais, trazendo maior segurança e eficiência ambiental ao processo. Além disso, vem investindo em projetos de reprocessamento de rejeitos por meio de plantas de concentração magnética de alta intensidade (CMAIs), como os projetos nas barragens B4 e Casa de Pedra, destinados a recuperar minério de ferro de materiais que eram dispostos como resíduos.

O reaproveitamento de minerais de baixo teor, aliado à produção de *pellet feed* de alto teor para siderurgia de baixo carbono é uma das iniciativas que CSN vem incorporando para circularidade de um setor historicamente baseado em fluxos lineares de extração e descarte.

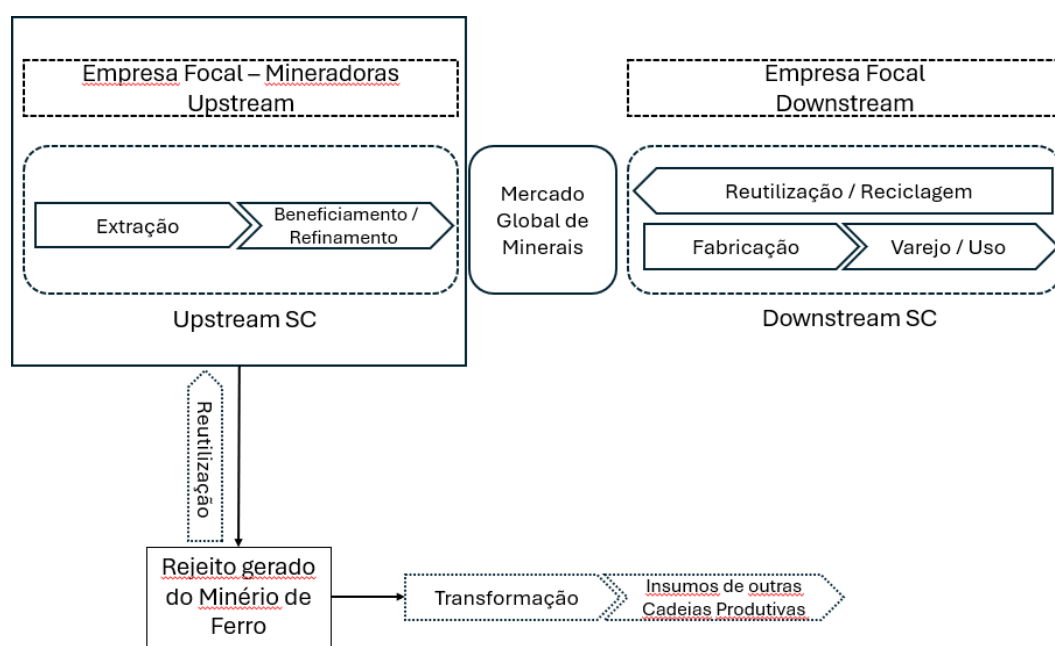
Ademais, possui uma plataforma chamada de “circula+”, que conecta digitalmente vendedores e compradores para a destinação de coprodutos e inservíveis, ampliando as oportunidades de reintegração de materiais em diversas cadeias produtivas. No entanto, essa plataforma está voltada à promoção de um ecossistema de economia circular de coprodutos e inservíveis e não com o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro.

5.2. Análise dos Dados Coletados

A análise da cadeia de valor da mineração, fundamentada no *framework* de Sauer e Seuring (2017), revela uma rede complexa, composta por múltiplos níveis e interações entre fornecedores, empresa focal e clientes industriais. No contexto deste estudo, as mineradoras, são tratadas como empresas focais, desempenhando um papel central na articulação de

processos que abrangem a extração, o beneficiamento, o reaproveitamento de rejeitos e a comercialização de insumos minerais. Essas atividades estão diretamente conectadas às demandas de setores como a siderurgia, a construção civil e a geração de energia, configurando uma cadeia de suprimentos altamente interdependente e sensível às pressões socioambientais contemporâneas.

Com base na análise das práticas de economia circular das três mineradoras investigadas, este estudo propôs uma adaptação da figura original desenvolvida por Sauer e Seuring (2017) para representar a cadeia de valor do minério de ferro. A nova versão incorpora, na cadeia a montante, a etapa de reaproveitamento e reutilização dos rejeitos de minério de ferro. A figura exemplifica a reintegração/reaproveitamento desse rejeito no processo produtivo, assim como, a transformação desses rejeitos em insumos para outras cadeias produtivas, conforme ilustrado na Figura 3 (Cadeia de Valor do Minério de Ferro):



Fonte: Adaptação de Sauer e Seuring (2017)

A prática de reprocessamento de rejeitos com o objetivo de recuperar o ferro residual e reintegrá-lo à cadeia produtiva tem sido observada nas operações da Vale S.A. e da CSN Mineração. No entanto, essa estratégia ainda é adotada de forma parcial. Por exemplo, a Vale estabeleceu como meta que, até 2030, 10% de sua produção anual de minério de ferro provenha de fontes consideradas circulares, o que indica que atualmente esse percentual é inferior.

No que se refere à transformação de rejeitos em insumos para outras cadeias produtivas, a Vale atua em duas frentes principais: o desenvolvimento da areia sustentável e a produção de artefatos pré-moldados voltados à construção civil, como blocos de vedação e pisos intertravados. Já a Anglo American também conduz iniciativas semelhantes, por meio de projetos-piloto voltados à fabricação de blocos de pavimentação, também conhecidos como “bloquetes”.

Por outro lado, na CSN Mineração não foram identificadas iniciativas voltadas especificamente à transformação de rejeitos de minério de ferro em produtos para outras cadeias. Embora a empresa mencione a plataforma “Circula+”, esta está mais voltada à promoção de um ecossistema de economia circular de coprodutos e inservíveis.

Essa reformulação gráfica da cadeia de valor materializa as duas rotas apontadas na literatura, que se trata da reintegração dos resíduos na própria cadeia, modelo *closed-loop*, em

que de acordo com (Guide e Van Wassenhove, 2009) se trata de um modelo mais completo de circularidade, no qual os materiais recuperados são reinseridos na própria cadeia produtiva de origem, substituindo matérias-primas virgens e criando um ciclo regenerativo completo. Já a outra rota apontada se trata da transformação desses resíduos em insumos destinados para setores externos, que seria o modelo *open-loop*, em que os resíduos de uma cadeia produtiva são redirecionados como insumos para outras cadeias distintas, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais e mitigando impactos ambientais (Kirchherr et al., 2017; Geissdoerfer et al., 2017).

Mesmo que essa prática possa acarretar perda de valor material ou funcionalidade original (*downcycling*), ainda assim contribui para a circularidade, uma vez que evita o descarte e fomenta a simbiose industrial entre setores (Bocken et al., 2016), como observado nas iniciativas da Vale e da Anglo American voltadas especialmente ao setor da construção civil.

Essas rotas representam diferentes graus de circularidade e estão associadas a distintos níveis de maturidade e impacto das iniciativas. Contudo, a inclusão de etapas de reaproveitamento de rejeitos e a comercialização de coprodutos evidenciam o avanço para modelos de economia circular, mesmo que ainda majoritariamente em arranjos *open-loop* ou circularidade parcial. A integração dessas etapas à cadeia tradicional do minério amplia o ciclo de vida dos materiais e reduz a necessidade de extração primária.

Considerando as contribuições de Korhonen et al. (2018) e Nobre e Tavares (2021), que propõem que a economia circular deve operar em três níveis: micro, meso e macro visando sustentabilidade integral com suporte de modelos de negócio inovadores. A Vale se destaca, tendo mais avanços nesse sentido, com metas claras para redução de rejeitos, uso de fontes circulares de minério e desenvolvimento de produtos como areia e blocos a partir de resíduos. A Anglo American, embora promissora em iniciativas como a pavimentação com bloquetes de rejeito e o investimento em plantas de filtragem, limita-se ao nível micro e ainda carece de escalabilidade e metas robustas. Já a CSN avança em práticas tecnológicas como a filtragem e reprocessamento de rejeitos com alto teor de ferro, o que está diretamente alinhado ao aproveitamento mineral, mas também de forma micro.

Esse cenário é corroborado por Upadhyay et al. (2021), que identificaram, com base em relatórios corporativos, uma tendência à fragmentação das ações circulares no setor de mineração. Ainda que algumas práticas, como a reciclagem de água e materiais, estejam presentes, elas raramente são articuladas a estratégias de longo prazo ou à governança corporativa, evidenciando uma circularidade confinada ao nível operacional e sem impacto mensurável em desempenho ambiental.

Em ambas as empresas, foram identificadas uma mudança da lógica linear de extrair-produzir-descartar (Kirchherr et al., 2017), que têm sido viabilizadas por estratégias de reaproveitamento, reprocessamento e reciclagem (Korhonen et al., 2018).

A cadeia de valor da mineração, portanto, deixa de ser linear e se aproxima de uma lógica em rede, em que o reaproveitamento e a revalorização de resíduos passam a integrar os fluxos produtivos, logísticos e comerciais. Isso requer inovações não apenas tecnológicas, mas também institucionais e regulatórias, além de novas formas de colaboração entre os agentes da cadeia e com atores externos, como universidades, governos e setor da construção civil.

Nesse contexto, destacam-se três impactos positivos associados à circularidade na cadeia: (i) a revalorização de resíduos, ao transformar rejeitos anteriormente descartados ou armazenados em barragens em insumos industriais reutilizáveis; (ii) a substituição de matérias-primas virgens, com a produção de areia sustentável que reduz a extração de areia natural de rios e cavas; e (iii) a mitigação de passivos ambientais, com a redução do volume de rejeitos acumulados e dos riscos relacionados ao armazenamento em barragens.

A literatura também alerta para os riscos de uma compreensão simplista da circularidade na mineração. Palacios & Espí Rodríguez (2022) mencionam que é importante avaliar o ciclo

de vida completo para mensurar o consumo adicional de água, emissões de carbono e custos energéticos no reaproveitamento de resíduos ou de reprocessamento de rejeitos. Com base nisso, os relatórios e o site apresentam dados qualitativos e algumas métricas, mas não fornecem o painel completo de indicadores que permitam avaliar o desempenho circular da cadeia de valor ao longo do tempo.

Ainda existem barreiras significativas à consolidação desses modelos circulares. Entre elas, destacam-se: a ausência de incentivos fiscais e regulatórios específicos para o reaproveitamento de rejeitos; limitações tecnológicas para o processamento eficiente desses materiais; a inexistência de padrões técnicos normativos que assegurem a segurança e qualidade de novos produtos derivados de rejeitos; e o baixo engajamento dos clientes industriais em práticas de compras sustentáveis. Esses obstáculos reforçam a necessidade de políticas públicas coordenadas, investimentos em P&D e mecanismos de mercado que promovam a adoção de soluções circulares ao longo da cadeia de valor mineral.

Tayebi-Khorami et al. (2019) argumentam que a transformação dos rejeitos em insumos utilizáveis depende da superação de barreiras regulatórias, técnicas e sociais, além da necessidade de uma avaliação crítica dos impactos do ciclo de vida. Barreiras como a ausência de padrões técnicos para os produtos reciclados, a aceitação de mercado e a viabilidade econômica permanecem entraves significativos à consolidação de práticas circulares na mineração.

Em síntese, a cadeia de valor da mineração está em transição: de um modelo linear baseado em extração e descarte para um modelo progressivamente mais circular, baseado em inovação, reaproveitamento e integração setorial. O desafio é consolidar essa transformação com governança, incentivos econômicos e tecnologias que permitam a circularidade total (*closed-loop*) no longo prazo.

6. Conclusão/Contribuição

O reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro emerge como uma alternativa estratégica e viável para impulsionar a transição do setor de mineração brasileiro para modelos mais sustentáveis e circulares. As práticas analisadas demonstram que é possível gerar valor econômico a partir de materiais antes tratados como resíduos, ao mesmo tempo em que se reduzem os impactos socioambientais e se fortalecem novos mercados.

Contudo, ainda se observa uma circularidade predominantemente *open-loop*, com a destinação dos rejeitos a outras cadeias produtivas, como a de construção civil, enquanto os modelos *closed-loop* permanecem restritos a iniciativas pontuais. O avanço em direção a uma circularidade de maior complexidade e integração requer o desenvolvimento de soluções inovadoras em *design* de processos e produtos, o fortalecimento de cadeias logísticas reversas eficientes e a adoção de mecanismos de rastreabilidade e certificação, capazes de garantir o retorno seguro e viável dos materiais ao ciclo produtivo.

A articulação entre diferentes atores como empresas, governos, universidades e sociedade civil é fundamental para escalar essas soluções, garantindo não apenas ganhos ambientais, mas também uma transição justa e economicamente viável. Este estudo contribui ao sistematizar práticas atuais e evidenciar barreiras estruturais à circularidade plena no setor, fornecendo subsídios para pesquisadores, formuladores de políticas e gestores corporativos.

Recomenda-se que pesquisas futuras explorem a integração entre plataformas digitais, rastreabilidade e simbiose industrial, bem como desenvolvam métricas para avaliação de circularidade aplicáveis à cadeia de mineração brasileira.

Referências Bibliográficas

- Anglo American. (2024). *Sustainability Report 2024*. <https://www.angloamerican.com/reporting>
- Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo* (Edição revisada e ampliada). São Paulo: Edições 70.
- Brazil Journal. (2024, 14 de outubro). *Economia circular em prol de uma mineração mais sustentável*. Brazil Journal. <https://braziljournal.com/brands/economia-circular-em-prol-de-uma-mineracao-mais-sustentavel/>
- Bocken, N. M., De 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>
- CSN Mineração. (2024). *Relato integrado 2024*. <https://esg.csn.com.br/nossa-empresa/relato-integrado-gri/>
- De Palacios, L. D. L. T. & Rodríguez, J. A. E. (2022). In mining, not everything is a circular economy: Case studies from recent mining projects in Iberia. *Resources Policy*, 78, 102798. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102798>
- Elkington, J. (1997). Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A. & Koh, S. C. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344–357. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015>
- Guide Jr, V. D. R. & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations research*, 57(1), 10-18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). (2025, 5 de fevereiro). *Mineração respondeu por 47% do saldo da balança comercial em 2024, mas encara novo imposto na fase final da reforma tributária*. IBRAM. https://ibram.org.br/noticia/desempenho_da_mineracao_2024/
- Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Korhonen, J., Honkasalo, A. & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

KPMG. (2023). *Brazil Country Mining Guide 2023*. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/br/pdf/2023/4/Brazil-Country-Mining-Guide-2023.pdf>

Nobre, G. C. & Tavares, E. (2021). The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127973>

Sauer, P. C. & Seuring, S. (2017). Sustainable supply chain management for minerals. *Journal of Cleaner Production*, 151, 235-249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.049>

Sehnem, S. & Pereira, S. C. F. (2019). Rumo à economia circular: Sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa*, 18(1), 35–62. <https://doi.org/10.21529/RECADM.2019002>

Shrivastava, P. & Vidhi, R. (2020). Pathway to sustainability in the mining industry: A case study of Alcoa and Rio Tinto. *Resources*, 9(6), 70. <https://doi.org/10.3390/resources9060070>

Slaper, T. F. & Hall, T. J. (2011). The Triple Bottom Line: What Is It and How Does It Work? *Indiana Business Review*, 86(1), 4–8.

Shrivastava, P. & Vidhi, R. (2020). Pathway to sustainability in the mining industry: A case study of Alcoa and Rio Tinto. *Resources*, 9(6), 70. <https://doi.org/10.3390/resources9060070>

Suen, M., Winter, M. & Lee, H. L. (2023). Circular supply chains: Design principles and governance mechanisms. *Journal of Supply Chain Management*, 59(3), 19–36.

Suen, D. W. S., Chan, E. M. H., Lau, Y. Y., Lee, R. H. P., Tsang, P. W. K., Ouyang, S., & Tsang, C. W. (2023). Sustainable textile raw materials: review on bioprocessing of textile waste via electrospinning. *Sustainability*, 15(15), 11638.

Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G. & Golev, A. (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9(5), 286. <https://doi.org/10.3390/min9050286>

Upadhyay, A., Laing, T., Kumar, V. & Dora, M. (2021). Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. *Resources Policy*, 72, 102037. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102037>

Vale S.A. (2024). *Relatório de Informações Financeiras Relacionadas à Sustentabilidade 2024*. Vale S.A (2024, 09 de dezembro). *Vale planeja recuperar cerca de 7 milhões de toneladas de minério de ferro este ano, a partir do reaproveitamento de rejeitos e estéril*. Vale. <https://vale.com/pt/w/vale-planeja-recuperar-cerca-de-7-milhoes-de-toneladas-de-minerio-de-ferro-a-partir-do-reaproveitamento-de-rejeitos-e-esteril-este-ano>

Vale S.A (2023, 17 de outubro). *Vale lança empresa para desenvolver negócio de Areia Sustentável*. Vale. <https://vale.com/pt/w/vale-lanca-empresa-para-desenvolver-negocio-de-areia-sustentavel-2>

Vale S.A (2025, 15 de abril). *Vale e UFMG anunciam parceria para soluções inovadoras em mineração circular*. Vale. <https://vale.com/pt/w/vale-e-ufmg-anunciam-parceria-para-solucoes-inovadoras-em-mineracao-circular-2>]

Van der Vorst, J. G. A. J., Beulens, A. J. M., & van Beek, P. (2002). Innovations in logistics and supply chain management. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Production Management Systems*, 15–26.

Wong, C. W. Y., & Ngai, E. W. T. (2019). Critical review of supply chain innovation research (1999–2016). *Industrial Marketing Management*, 82, 158–187. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2019.01.003>