

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**GABRIEL GOMES SANTOS
GABRIEL LUCAS PEREIRA RAMOS
KAIO VINICIUS DE OLIVEIRA**

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE SiO_2 EM CADEIA PRODUTIVA
SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

**GABRIEL GOMES SANTOS
GABRIEL LUCAS PEREIRA RAMOS
KAIO VINICIUS DE OLIVEIRA**

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE SiO_2 EM CADEIA PRODUTIVA
SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Ciência e Tecnologia
pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Wilson Carlesso dos Reis

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Santos, Gabriel Gomes.

REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE SiO_2 EM CADEIA PRODUTIVA
SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR /

Gabriel Gomes Santos, Gabriel Lucas Pereira Ramos, Kaio Vinicius de
Oliveira. - Poços de Caldas, MG, 2025.

35 f. : il. -

Orientador(a): Vilson Carlesso dos Reis.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de
Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Rejeito de sílica. 2. Rejeitos de mineração. 3. Economia circular na
mineração. 4. Sandy tailings. 5. Construção civil. I. Ramos, Gabriel Lucas
Pereira. II. Oliveira, Kaio Vinicius de. III. Reis, Vilson Carlesso dos, orient.
IV. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

**GABRIEL GOMES SANTOS
GABRIEL LUCAS PEREIRA RAMOS
KAIO VINICIUS DE OLIVEIRA**

**REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE SiO_2 EM CADEIA PRODUTIVA
SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO SOB A ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do(a) Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 03 de dezembro de 2025

Prof.^a Dr. Carolina Del Roveri
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Matheus Fernando Ancelmi
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Wilson Carlesso dos Reis
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Agradecemos de forma especial ao nosso professor orientador, **Vilson Carlesso dos Reis**, pela dedicação, paciência e orientação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua competência, disponibilidade e incentivo foram fundamentais para que nós pudéssemos superar desafios, aprimorar conhecimentos e concluir esta etapa tão importante da nossa formação.

Somos gratos pelas contribuições técnicas, pelos apontamentos precisos e pelo comprometimento demonstrado em cada encontro. Seu apoio foi essencial para que este trabalho alcançasse qualidade e aprofundamento.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso analisou o reaproveitamento de rejeitos ricos em dióxido de silício (SiO_2), com ênfase na cadeia do minério de ferro, sob a ótica da economia circular. A partir de revisão bibliográfica e de dados do Anuário Mineral Brasileiro (2019–2023), verificou-se que a mineração de ferro é a principal geradora de rejeitos com fração silicosa relevante, especialmente no Quadrilátero Ferrífero, onde grandes volumes são estocados em barragens e pilhas de rejeito, configurando importante passivo ambiental. A literatura consultada indicou que *sandy tailings* com teores entre 85% e 95% de SiO_2 apresentam características físico-químicas adequadas para uso em diferentes aplicações, como produção de areia artificial (*ore-sand*), agregados para concretos, argamassas, blocos, pré-moldados, camadas de pavimentação e ligantes alternativos, incluindo geopolímeros com resistências superiores a 40 MPa. Casos práticos, como a Fábrica de Blocos do Pico e a produção de areia sustentável em operações da Vale, evidenciam a possibilidade de destinar centenas de milhares de toneladas de rejeitos à construção civil, reduzindo a necessidade de extração de agregados naturais e a dependência de estruturas de contenção. Concluiu-se que os rejeitos silicosos, quando adequadamente caracterizados e processados, podem ser reinseridos em cadeias produtivas sustentáveis, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais, a diminuição de passivos e o avanço da mineração em direção a um modelo mais circular.

Palavras-chave: rejeito de sílica; rejeitos de mineração; economia circular na mineração; *sandy tailings*; *silica-rich tailings*; construção civil.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis analyzed the reuse of silicon dioxide-rich (SiO_2) tailings, with emphasis on the iron ore supply chain, from the perspective of circular economy principles. Based on a literature review and data from the *Brazilian Mineral Yearbook* (2019–2023), it was found that iron ore mining is the main generator of tailings with a significant siliceous fraction, especially in the Quadrilátero Ferrífero region, where large volumes are stored in dams and tailings piles, representing a major environmental liability. The reviewed literature indicated that sandy tailings containing between 85% and 95% SiO_2 exhibit suitable physicochemical characteristics for different applications, such as the production of artificial sand (ore-sand), aggregates for concrete, mortars, blocks, precast elements, pavement layers, and alternative binders, including geopolymers with strengths exceeding 40 MPa. Practical cases, such as the Pico Block Factory and the production of sustainable sand in Vale's operations, demonstrate the feasibility of allocating hundreds of thousands of tons of tailings to civil construction, reducing the need for natural aggregate extraction and decreasing reliance on containment structures. It is concluded that silica-rich tailings, when properly characterized and processed, can be reintegrated into sustainable production chains, contributing to the mitigation of environmental impacts, the reduction of liabilities, and the advancement of mining toward a more circular model.

Keywords: silica tailings; mining tailings; circular economy in mining; sandy tailings; silica-rich tailings; civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de rejeitos produzidos (t) por substância mineral no Brasil entre 2019 e 2023.	27
Figura 2 - Gráfico de rejeitos de ferro (t) no Brasil entre 2019 e 2023	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção bruta (ROM), produção beneficiada, rejeitos acumulados e Teor por substância mineral no Brasil (2019–2023).	26
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo Geral.....	12
1.1.2. Objetivos Específicos	12
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	12
2.1. GERAÇÃO DE REJEITOS MINERAIS NO BRASIL.....	12
2.2. CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DO REJEITO DE SiO ₂	14
2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS E PASSIVOS ASSOCIADOS	16
2.4. CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS À MINERAÇÃO	18
2.5. PESQUISAS E INICIATIVAS DE REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS RICOS EM SÍLICA	21
3. METODOLOGIA.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

Mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade que moldou, ao longo do tempo, as paisagens culturais e influenciou a evolução das civilizações em todas as partes do mundo. A exploração mineral se tornou mais evidente a partir da Primeira Revolução Industrial, período em que suas atividades passaram a ocupar papel econômico central no Brasil e no mundo. A busca por recursos minerais permanece intensa, pois essas matérias-primas são a base de obras de infraestrutura, produção de energia, ferramentas e diversos outros setores essenciais. (Amarante, 2017).

Contudo, junto com a lavra e o tratamento dos minerais, aparece um problema complexo: a produção cada vez maior de rejeitos. Isso acontece porque a concentração do minério de interesse presente nos locais de extração tem diminuído, sendo necessário processar mais material para manter o nível de produção. Segundo o (IBRAM, 2016) essa produção de rejeitos coloca mais pressão na forma como eles são descartados, na segurança dos locais de armazenamento, no uso da água e nos danos ao meio ambiente.

Diante disso, é preciso reformular o paradigma de gestão de rejeitos: em vez de apenas lidar com os rejeitos como um problema a ser contido, é preciso pensar em como aproveitá-los e usá-los em outras atividades produtivas, de forma que isso reduza os impactos ambientais associados à disposição convencional e promover a circularidade dos materiais, em consonância com os princípios da economia circular. É nesse sentido que este estudo se encaixa, avalia rotas tecnológicas viáveis detalhadas sobre como reaproveitar rejeitos com elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) em um sistema de produção sustentável.

Sob essa perspectiva, o estudo busca avaliar como materiais secundários do beneficiamento podem ser transformados em produtos de valor agregado, diminuindo a necessidade de usar matérias-primas novas, mitigando os impactos ambientais associados à disposição convencional causados pelo descarte e contribuindo para ganhos econômicos e socioambientais.

O estudo é relevante porque estabelece relações entre desempenho ambiental, segurança operacional e eficiência produtiva ao propor rotas de reaproveitamento de rejeitos silicosos, como insumo para cadeias de alto volume (construção e pavimentação).

No Brasil, a proibição do alteamento a montante intensificou a necessidade de reduzir os volumes de rejeitos e diminuir a dependência de barragens. Nesse contexto, ganha relevância a valorização de materiais com alto teor de sílica, convertendo-os em agregados secundários ou insumos para cadeias de grande escala.

Em paralelo, a crise global da areia demanda alternativas sustentáveis aos agregados naturais, reforçando a pertinência de rotas tecnológicas baseadas em materiais ricos em sílica (VALE 08, 2022). Ao desviar rejeitos do estoque e substituir areia natural, rotas tecnológicas baseadas em materiais ricos em sílica reduzem-se os impactos sobre corpos d'água e mitiga-se a necessidade de extração de agregados naturais. Em paralelo, a valorização de frações silicosas promove maior circularidade hídrica e material nos empreendimentos, reduzindo volumes estocados e ampliando a recirculação hídrica. Os produtos resultantes devem atender às normas técnicas aplicáveis.

Do ponto de vista socioeconômico, a oferta regular de agregado secundário com variabilidade controlada e desempenho previsível cria demanda regional, reduz a pressão de preços sobre jazidas de areia natural e amplia a base de receitas do empreendimento por meio da comercialização de coprodutos em diferentes segmentos (construção, pavimentação e pré-moldados). Esses resultados são coerentes com a agenda ESG (Ambiental, Social e Governança) e com metas de desenvolvimento sustentável, ao fortalecer cadeias locais, gerar emprego e mitigar passivos. (Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022).

Do ponto de vista técnico, o uso em concretos, argamassas, blocos e camadas de pavimento exige condicionamento de processo: classificação granulométrica, desaguamento/filtragem, mistura e controle do teor de finos e de impurezas, de modo a atender às normas técnicas aplicáveis. Para aplicações avançadas em ligantes alternativos como geopolímeros e compósitos cimentícios de baixa emissão requerem-se adicionalmente critérios de reatividade e comprovação de desempenho de longo prazo (durabilidade, estabilidade volumétrica e resistência), assegurando conformidade com requisitos específicos. (Duarte; Lameiras, 2022).

Assim, este trabalho teve como foco os rejeitos ricos em sílica (SiO_2) e suas contribuições para a sustentabilidade em operações minerais: (1) ao reduzir riscos associados ao armazenamento de rejeitos; (2) ao possibilitar a substituição parcial

de agregados naturais em aplicações de grande escala; (3) ao viabilizar materiais com menor pegada de carbono; e (4) ao favorecer a estruturação de uma cadeia produtiva sustentável baseada em especificações técnicas, rastreabilidade e demanda de mercado. Portanto, o estudo investigou e comparou rotas tecnológicas de reaproveitamento de rejeitos silicosos, representando um passo fundamental para avançar do paradigma de “conter e monitorar” para o de “valorizar com segurança”, integrando engenharia de processo, desempenho de materiais e princípios de governança ambiental.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Investigar quais tipos de minerais e cadeias de beneficiamento geram rejeitos com alto teor de sílica (SiO_2) e analisar, a partir da literatura, as principais iniciativas de reaproveitamento alinhadas aos princípios da economia circular.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Identificar, na literatura técnico-científica, os setores minerais com maior geração de rejeitos silicosos.
- b) Revisar estudos e projetos que empregam rejeitos ricos em SiO_2 em novas cadeias produtivas (concretos, argamassas, pavimentação e ligantes alternativos).
- c) Discutir vantagens ambientais e econômicas do reaproveitamento incluindo redução de volumes estocados, mitigação da extração de agregados naturais e geração de valor regional sob a ótica da economia circular.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. GERAÇÃO DE REJEITOS MINERAIS NO BRASIL

A geração de rejeitos minerais no Brasil é um dos principais desafios associados à atividade de mineração, especialmente em função da grande escala de

produção mineral do país. Em praticamente todos os processos de beneficiamento, uma parcela significativa do material extraído é descartada sob a forma de rejeito, seja devido à baixa concentração do minério de interesse, à presença de impurezas ou às limitações tecnológicas de aproveitamento. Esse cenário torna o tema especialmente relevante em estados com forte vocação mineradora, como Minas Gerais e Pará, onde grandes volumes de rejeitos são produzidos diariamente e armazenados em barragens ou pilhas de disposição.

Entre os diferentes tipos de rejeitos gerados, destacam-se aqueles ricos em sílica (SiO_2), oriundos principalmente das operações de beneficiamento de minério de ferro. Durante esse processo, a fração mais arenosa e fina, resultante da separação entre o minério e os minerais de ganga, é descartada sob a forma de *sandy tailing* ou *slime*. O *sandy tailing* é composto predominantemente por quartzo fino, podendo conter entre 85% e 95% de dióxido de silício, enquanto o slime apresenta uma granulometria ainda mais fina, associada a teores mais elevados de óxidos de ferro e alumínio. Ambos os rejeitos, apesar de quimicamente inertes e não perigosos, representam um passivo ambiental expressivo em função de seu grande volume e da necessidade de áreas específicas para disposição segura. (Golev et al., 2022)

Nos últimos anos, o avanço das pesquisas sobre o reaproveitamento desses rejeitos tem evidenciado que uma parcela considerável desse material possui características físico-químicas adequadas para uso em diversas aplicações industriais. Essa constatação tem levado à reformulação da percepção de rejeitos arenosos, que passam a ser considerados potenciais coprodutos, capazes de substituir parcialmente recursos naturais não renováveis, como a areia natural utilizada na construção civil. Dentro desse contexto, surge o conceito de *ore-sand*, que se refere à areia coproduzida durante o beneficiamento mineral e que pode ser destinada a diferentes usos, reduzindo a necessidade de extração de areia de rios e margens fluviais. (Golev et al., 2022)

No Brasil, a adoção do conceito de *ore-sand* tem ganhado destaque principalmente em regiões mineradoras de Minas Gerais, onde o reaproveitamento de rejeitos ricos em sílica vem sendo implementado como alternativa sustentável para minimizar os impactos ambientais da disposição convencional. Empresas como a Vale S.A. têm desenvolvido projetos e parcerias voltados à utilização do material arenoso gerado nas plantas de beneficiamento, transformando-o em insumo para a

produção de blocos de concreto, pavimentos e outros artefatos de construção. Essa prática contribui não apenas para a redução do passivo ambiental e dos riscos associados às barragens de rejeitos, mas também para o fortalecimento dos princípios da economia circular dentro da cadeia mineral. (Duarte; Lameiras, 2022).

Adicionalmente, estudos recentes indicam que a geração de rejeitos de sílica tende a crescer de forma proporcional à expansão da mineração de ferro, especialmente em razão do aumento da demanda global por aço e materiais de construção. Assim, compreender a origem, as características e o potencial de reaproveitamento desses rejeitos torna-se essencial para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à sustentabilidade do setor mineral. Dessa forma, a geração de rejeitos minerais no Brasil, particularmente aqueles compostos por dióxido de silício, deixa de ser vista apenas como um problema ambiental e passa a representar uma oportunidade de inovação tecnológica e econômica, alinhada às práticas de mineração sustentável.

2.2. CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DO REJEITO DE SiO_2

A caracterização dos rejeitos ricos em dióxido de silício (SiO_2) é fundamental para compreender seu comportamento físico-químico e as possibilidades de reaproveitamento em diferentes setores industriais. A sílica, principal componente desses rejeitos, é um mineral amplamente distribuído na crosta terrestre e apresenta grande variedade estrutural, podendo ocorrer nas formas cristalina, amorfa, hidratada ou hidroxilada (GOMES; FURTADO; SOUZA, 2018). Essa diversidade estrutural está diretamente associada às suas propriedades e à maneira como o material se comporta nos processos de beneficiamento e nas aplicações industriais. Do ponto de vista estrutural, o SiO_2 é composto por ligações entre átomos de silício e oxigênio que formam uma rede tridimensional de tetraedros SiO_4 altamente estáveis. Nessa estrutura, cada átomo de silício está covalentemente ligado a quatro átomos de oxigênio, em geometria aproximadamente tetraédrica, com hibridização sp^3 , enquanto cada oxigênio compartilha elétrons com dois silícios vizinhos. Essa configuração confere ao composto elevada resistência térmica, mecânica e química, além de grande estabilidade frente a variações de temperatura e pressão. A força das ligações Si-O decorre do caráter covalente forte e da elevada energia de ligação entre silício e oxigênio, o que explica a durabilidade do material e sua baixa

reatividade em condições ambientais comuns (GOMES; FURTADO; SOUZA, 2018). Os rejeitos que contêm sílica apresentam características que variam conforme a origem geológica e o método de beneficiamento empregado. Fatores como granulometria, teor de impurezas, presença de fases amorfas ou cristalinas e morfologia das partículas influenciam diretamente a qualidade e o potencial de uso do material. De modo geral, esses rejeitos exibem uma composição predominantemente inerte e mineralogicamente simples, com predomínio de quartzo, acompanhado por pequenas quantidades de minerais de ferro e alumínio.

A sílica amorfa presente em parte dos rejeitos é especialmente importante por apresentar uma estrutura desordenada, com elevada área superficial e abundância de grupos silanol (Si-OH), que aumentam a reatividade e a capacidade de adsorção do material. Essas propriedades tornam o rejeito de sílica um potencial substituto para matérias-primas utilizadas em processos que exigem alta reatividade, como a produção de materiais cimentícios alternativos e geopoliméricos (Duarte; Lameiras, 2022).

As diferenças granulométricas também são um aspecto determinante na caracterização. Os rejeitos podem conter desde partículas finas até frações mais arenosas, o que influencia o desempenho do material em usos tecnológicos e construtivos. A distribuição de tamanho de grãos afeta parâmetros como permeabilidade, densidade e comportamento mecânico, sendo, portanto, um fator essencial na seleção de aplicações adequadas.

Além disso, os processos de beneficiamento aplicados na extração mineral, como lavagem e deslamagem, favorecem a obtenção de rejeitos com baixo teor de contaminantes e elevado grau de pureza, especialmente quando são removidas as partículas finas associadas a óxidos metálicos. Isso contribui para gerar um subproduto com propriedades compatíveis com as exigências técnicas de setores como o da construção civil, da cerâmica e da fabricação de vidros (Duarte; Lameiras, 2022).

De forma geral, os rejeitos ricos em dióxido de silício apresentam características que os diferenciam de outros tipos de resíduos minerais: são estáveis, de composição predominantemente inerte e com propriedades físico-químicas que favorecem seu reaproveitamento. A análise dessas propriedades é essencial para definir rotas tecnológicas de valorização do material e promover seu enquadramento em cadeias produtivas sustentáveis.

2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS E PASSIVOS ASSOCIADOS

A geração e o acúmulo de rejeitos minerais ricos em sílica configuram-se como um dos principais desafios ambientais e de gestão no contexto da mineração contemporânea. Apesar de apresentarem, em sua maioria, caráter inerte e baixa periculosidade química, esses rejeitos assumem importância significativa em função do seu elevado volume e da forma como são dispostos no meio ambiente. O armazenamento prolongado em barragens, pilhas ou bacias de contenção ocupa grandes extensões territoriais e pode gerar impactos cumulativos sobre o solo, a água e a paisagem, resultando em passivos ambientais de difícil remediação (Duarte; Lameiras, 2022).

Esses impactos se manifestam de diversas maneiras, sendo os mais recorrentes a degradação de áreas superficiais, o assoreamento de corpos hídricos, a compactação do solo e a alteração da drenagem natural. A disposição inadequada de rejeitos finos, como os compostos predominantemente por dióxido de silício (SiO_2), pode ocasionar dispersão de poeiras e formação de material particulado, afetando a qualidade do ar e gerando desconforto e riscos à saúde das comunidades próximas. A inalação de partículas de sílica cristalina na fração respirável (geralmente partículas de quartzo com diâmetro inferior a 10 μm) é reconhecida por provocar doenças respiratórias, como a silicose. Dessa forma, mesmo rejeitos considerados quimicamente estáveis podem representar risco à saúde quando contêm sílica nessa forma e são manejados de modo inadequado (Lima).

No contexto brasileiro, o debate sobre a gestão de rejeitos ganhou destaque após os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos relacionados ao rompimento de barragens de contenção. Esses episódios, embora associados a rejeitos de minério de ferro e não especificamente à sílica, expuseram a fragilidade de muitas estruturas e a ausência de práticas eficazes de monitoramento e controle. As tragédias demonstraram que a negligência no manejo e na fiscalização dos rejeitos pode gerar danos ambientais de grandes proporções, afetando bacias hidrográficas, ecossistemas e comunidades inteiras. Nesse sentido, o estudo dos rejeitos ricos em sílica deve considerar também a segurança estrutural e o planejamento de longo prazo, a fim de evitar riscos semelhantes, mesmo em

materiais de menor toxicidade (Lima).

Além dos riscos diretos, o acúmulo prolongado de rejeitos de sílica contribui para a perda de biodiversidade e a fragmentação de ecossistemas, uma vez que a ocupação de áreas extensas para deposição reduz o espaço destinado à vegetação nativa e altera as condições ecológicas locais. O empobrecimento do solo e a impermeabilização de camadas superficiais prejudicam o processo de regeneração natural, dificultando a recuperação ambiental posterior. Assim, os rejeitos passam a constituir não apenas um passivo físico, mas também ecológico, exigindo ações planejadas de reabilitação e recomposição da paisagem.

Outro aspecto relevante diz respeito ao impacto visual e à alteração da morfologia do terreno. As pilhas de rejeitos e os depósitos superficiais frequentemente modificam a topografia original, criando feições artificiais que interferem na dinâmica de drenagem e no equilíbrio geotécnico das encostas. Em regiões de relevo acidentado, a saturação hídrica desses materiais pode gerar processos de instabilidade e erosão, comprometendo a segurança de áreas adjacentes. A falta de drenagem adequada também contribui para o aumento da turbidez e da carga de sedimentos em corpos d'água, intensificando o processo de assoreamento e reduzindo a qualidade hídrica (Duarte; Lameiras, 2022).

A literatura recente tem destacado a importância da aplicação de ferramentas tecnológicas no monitoramento e controle de rejeitos minerais. O uso de geoprocessamento, sensoriamento remoto e modelagem tridimensional do relevo permite a análise espacial detalhada das áreas de deposição, possibilitando a identificação de zonas de risco, o monitoramento de deformações e a previsão de possíveis rupturas (Lima). Essas tecnologias, associadas a sistemas de drenagem e compactação controlada, podem ser aplicadas também ao gerenciamento dos rejeitos ricos em sílica, contribuindo para reduzir a probabilidade de falhas estruturais e minimizar os impactos ambientais.

No campo da sustentabilidade, o reaproveitamento de rejeitos tem se consolidado como uma das principais alternativas para a mitigação de passivos. No caso específico dos rejeitos de sílica, há um potencial expressivo de utilização como insumo em diversas cadeias produtivas. O material pode ser empregado na fabricação de argamassas, concretos, blocos cerâmicos, vidros e até em formulações de polímeros reforçados. Essa abordagem se insere nos princípios da economia circular, na qual os resíduos são reinseridos no ciclo produtivo, reduzindo

a necessidade de extração de matérias-primas virgens e evitando a ampliação de áreas de disposição (Duarte; Lameiras, 2022).

A adoção de práticas sustentáveis na gestão de rejeitos também tem um papel estratégico na imagem institucional das mineradoras, refletindo diretamente em sua aceitação social e na obtenção de licenças ambientais. A integração entre gestão ambiental, inovação tecnológica e responsabilidade social empresarial é essencial para transformar os rejeitos em recursos úteis, promovendo simultaneamente ganhos econômicos e ambientais. A recuperação de áreas degradadas e o aproveitamento de rejeitos ricos em sílica representam, portanto, um avanço significativo rumo à mineração de baixo impacto e à consolidação de um modelo produtivo mais equilibrado.

Dessa forma, os impactos ambientais e os passivos associados aos rejeitos de sílica não devem ser analisados apenas sob a ótica dos danos imediatos, mas como um componente estruturante da sustentabilidade mineral. A abordagem contemporânea de gestão de rejeitos exige planejamento integrado, uso de tecnologias preditivas e investimento contínuo em pesquisa aplicada. O equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental depende da capacidade de incorporar soluções inovadoras, reduzir a geração de resíduos e promover o reaproveitamento responsável. Em síntese, a revalorização dos rejeitos ricos em sílica representa não apenas uma oportunidade técnica e econômica, mas também um compromisso ético com o futuro da mineração e com a proteção dos ecossistemas brasileiros.

2.4. CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS À MINERAÇÃO

A mineração, historicamente pautada em um modelo linear de produção, extração, beneficiamento, uso e descarte, enfrenta atualmente a necessidade de transição para um paradigma mais sustentável e eficiente na gestão de recursos. Nesse contexto, o conceito de economia circular surge como uma alternativa promissora, ao propor a reinserção dos resíduos e subprodutos no ciclo produtivo, reduzindo a geração de passivos ambientais e o consumo de novos insumos minerais. De acordo com (Golev et al., 2022), a adoção de estratégias circulares na mineração visa a revalorização dos rejeitos minerais, a extensão da vida útil das jazidas e a minimização de impactos socioambientais associados às operações

extrativas.

O princípio fundamental da economia circular consiste em fechar os ciclos de produção, promovendo a reutilização, a reciclagem e o reaproveitamento de materiais que, no modelo tradicional, seriam descartados. Na mineração, isso significa reavaliar o status dos rejeitos, não mais como resíduos sem valor econômico, mas como recursos secundários capazes de retornar às cadeias produtivas. Essa mudança de paradigma é especialmente relevante no caso dos rejeitos ricos em sílica, os quais, devido à sua composição predominantemente inerte e elevada pureza, apresentam elevado potencial de aproveitamento em diferentes setores industriais. Conforme discutido por (Duarte; Lameiras, 2022), a utilização desses rejeitos na fabricação de produtos como blocos, concretos, pavimentos e geopolímeros representa uma estratégia que alia sustentabilidade e valor agregado, reduzindo simultaneamente os custos de disposição e os impactos ambientais.

A aplicação prática da economia circular na mineração requer a integração de ferramentas tecnológicas, políticas públicas e inovação empresarial. A transformação de rejeitos em insumos depende de etapas de beneficiamento e adequação tecnológica que garantam a qualidade e a segurança dos novos produtos. No caso dos rejeitos de sílica, por exemplo, processos como a classificação granulométrica, a purificação e a ativação alcalina são fundamentais para viabilizar seu uso em materiais de construção e em ligas metálicas. Além disso, iniciativas como o conceito de ore-sand, que propõe o reaproveitamento da areia coproduzida durante o beneficiamento mineral, têm se mostrado uma alternativa viável à extração de areia natural, contribuindo para a redução da pressão sobre ecossistemas fluviais e para a economia de recursos (Golev et al., 2022).

Segundo (Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022), a economia circular na mineração não se restringe apenas à gestão dos resíduos, mas envolve uma reestruturação mais ampla das cadeias produtivas. Isso inclui a incorporação de práticas de ecoeficiência, a otimização do uso da água e da energia, e o investimento em tecnologias limpas. A revalorização de rejeitos deve ser acompanhada de instrumentos de monitoramento que assegurem o desempenho ambiental e técnico dos novos produtos, evitando que soluções sustentáveis resultem em riscos secundários. Assim, o setor mineral passa a adotar um modelo de produção regenerativa, no qual os materiais e a energia circulam de forma contínua, reduzindo

a dependência de novas explorações e fortalecendo a resiliência ambiental das operações (Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022). No Brasil, o avanço das políticas de sustentabilidade e a pressão por soluções de reaproveitamento têm incentivado grandes empresas mineradoras a investir em programas de economia circular. A Vale, por exemplo, implementou em Minas Gerais projetos como a Fábrica de Blocos do Pico, inaugurada em 2020, que utiliza rejeitos arenosos provenientes da mineração de ferro na fabricação de blocos e pisos intertravados (VALE, 2020) Essa iniciativa representa uma mudança de paradigma na gestão dos rejeitos, ao transformar materiais anteriormente descartados em produtos de valor econômico, reduzindo o volume de resíduos armazenados em barragens e ampliando as oportunidades de diversificação industrial. Além de contribuir para a mitigação dos impactos ambientais, essas ações demonstram o potencial de geração de emprego e renda associado à circularidade no setor mineral.

A implementação efetiva da economia circular na mineração, entretanto, ainda enfrenta desafios significativos. A falta de normatização técnica específica para o uso de rejeitos como insumos industriais, as barreiras logísticas relacionadas ao transporte e à estocagem, e os altos custos de tecnologias de beneficiamento são fatores que limitam sua aplicação em larga escala. Ademais, a percepção social e institucional acerca dos rejeitos como “materiais de descarte” ainda dificulta a aceitação de produtos derivados desses resíduos. Superar essas barreiras requer o fortalecimento de políticas públicas integradas, incentivos fiscais e programas de capacitação voltados à inovação tecnológica e à gestão ambiental. A articulação entre governo, universidades e empresas é essencial para consolidar uma cultura de reaproveitamento e valor compartilhado na mineração brasileira.

Por fim, o avanço da economia circular representa uma oportunidade estratégica para redefinir o papel da mineração em um cenário de transição ecológica global. A integração de práticas sustentáveis ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a lavra até a disposição final dos resíduos, não apenas reduz os impactos ambientais, mas também reposiciona o setor como agente ativo na construção de uma economia de baixo carbono. O aproveitamento de rejeitos ricos em sílica ilustra como a inovação pode transformar passivos em ativos, contribuindo para a segurança das operações, a sustentabilidade das comunidades e a eficiência no uso de recursos naturais. Dessa forma, a economia circular aplicada à mineração se consolida como um caminho indispensável para o equilíbrio entre

desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

2.5. PESQUISAS E INICIATIVAS DE REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS RICOS EM SÍLICA

O avanço das pesquisas sobre o reaproveitamento de rejeitos minerais tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionado pela necessidade de conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental. No caso dos rejeitos ricos em sílica, essa tendência se destaca pela versatilidade do material e pelo potencial de substituição de recursos naturais escassos. A sílica, em suas diversas formas, é amplamente utilizada em setores estratégicos da economia, como construção civil, indústria cerâmica, química e eletrônica, o que torna o estudo de seu reaproveitamento um campo promissor tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental (GOMES; FURTADO; SOUZA, 2018).

Em âmbito internacional, pesquisas têm demonstrado que rejeitos ricos em SiO_2 provenientes de atividades de mineração e beneficiamento podem ser transformados em produtos de alto valor agregado, como geopolímeros, sílica amorfa de alta pureza e agregados para construção civil. Estudos realizados por (Duarte; Lameiras, 2022) evidenciam que o reaproveitamento desses rejeitos permite alcançar resistências mecânicas superiores a 40 MPa em geopolímeros ativados alcalinamente, demonstrando viabilidade técnica e potencial econômico. Esses materiais, além de substituírem parcialmente o cimento Portland, cuja produção é intensiva em emissões de CO_2 , apresentam vantagens quanto à durabilidade e ao desempenho mecânico, reforçando sua relevância na busca por alternativas mais sustentáveis para o setor da construção.

Outros estudos apontam que os rejeitos arenosos ricos em sílica, como o *sandy tailing*, podem ser utilizados na fabricação de areia artificial e concretos estruturais, contribuindo para mitigar a escassez de areia natural e reduzir a pressão sobre ecossistemas fluviais. Essa prática, amplamente alinhada ao conceito de *ore-sand*, tem sido testada em escala piloto e industrial por empresas mineradoras e instituições de pesquisa. A Vale S.A., por exemplo, desenvolveu projetos pioneiros em Minas Gerais, como a Fábrica de Blocos do Pico e a produção de areia sustentável na Mina Viga, que transformam rejeitos arenosos em insumos para pavimentação e construção civil (VALE, 2020; VALE 08, 2022). Essas iniciativas ilustram a aplicação concreta dos princípios da economia circular no setor mineral,

promovendo a transformação de passivos ambientais em produtos economicamente viáveis.

Além das aplicações construtivas, pesquisas recentes têm explorado a conversão dos rejeitos de sílica em sílica amorfa de alta pureza, utilizada na obtenção de silício metalúrgico e ligas Fe–Si. O processo envolve a pelletização do material com redutores carbonáceos e posterior processamento em fornos de arco submerso, resultando em um produto de elevado valor tecnológico. Essa rota, embora mais complexa e energeticamente intensiva, representa uma alternativa sustentável à exploração direta de quartzo de alta pureza, contribuindo para a diversificação da matriz produtiva e para a valorização de resíduos antes considerados inservíveis (Duarte; Lameiras, 2022).

No campo da engenharia de materiais, há também um crescente interesse na incorporação de rejeitos de sílica como carga mineral em polímeros e pigmentos industriais, ampliando seu uso para setores de maior valor agregado. Pesquisas conduzidas por universidades brasileiras e centros tecnológicos têm demonstrado que a adição controlada de partículas de sílica pode melhorar propriedades como resistência térmica, estabilidade dimensional e resistência à abrasão em compósitos plásticos e cerâmicos, em linha com o comportamento descrito por Gomes, Furtado e Souza (2018) para diferentes formas de SiO_2 e suas aplicações industriais. Resultados discutidos em estudos sobre reaproveitamento de resíduos minerais também apontam para o uso de frações silicosas em materiais de maior valor agregado, reforçando a importância de rotas que combinam desempenho tecnológico e redução de impactos ambientais (Golev et al., 2022; Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022). Tais avanços reforçam o papel da pesquisa aplicada como ponte entre a mineração tradicional e a inovação tecnológica orientada pela sustentabilidade.

Do ponto de vista ambiental, o reaproveitamento de rejeitos ricos em sílica apresenta benefícios expressivos. A redução do volume de resíduos destinados a barragens e pilhas de contenção diminui significativamente os riscos de instabilidade estrutural e de contaminação de corpos d'água, aspecto amplamente discutido em documentos técnicos sobre gestão de rejeitos no Brasil (IBRAM, 2016; Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022). Além disso, o uso desses materiais como substitutos de matérias-primas virgens contribui para a diminuição da pegada ecológica da mineração, uma vez que reduz a necessidade de novas áreas de lavra e o consumo

energético associado à extração, em consonância com as diretrizes de economia circular e de “cradle-to-cradle” aplicadas a resíduos minerais (Golev et al., 2022; Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022). Essa abordagem está alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas, especialmente no que se refere à produção e ao consumo responsáveis e à ação climática, frequentemente citados em relatórios corporativos e iniciativas de reaproveitamento de rejeitos, como os projetos de areia sustentável desenvolvidos pela Vale (VALE 08, 2022).

A literatura recente também destaca o papel do geoprocessamento e da modelagem computacional no planejamento do reaproveitamento de rejeitos. Ferramentas de análise espacial permitem mapear depósitos secundários, avaliar sua composição e determinar as áreas mais adequadas para extração e beneficiamento. Conforme observado por (Lima), a integração dessas tecnologias à gestão de rejeitos favorece a tomada de decisões mais seguras e precisas, reduzindo o desperdício e otimizando os processos de reaproveitamento. Revisões sobre o setor mineral brasileiro reforçam esse movimento ao apontar a digitalização, o monitoramento remoto e o uso de modelos preditivos como elementos centrais na modernização da gestão de resíduos e rejeitos (Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022). Essa combinação de ciência de dados, engenharia e sustentabilidade representa um passo importante rumo à modernização do setor mineral brasileiro.

Apesar dos avanços observados, ainda existem desafios para a consolidação do reaproveitamento de rejeitos ricos em sílica em larga escala. Barreiras econômicas, ausência de regulamentação específica, limitações logísticas e resistência do mercado à adoção de produtos derivados de resíduos são fatores que restringem sua expansão, conforme apontado em estudos sobre gestão de rejeitos e análise de alternativas regulatórias. Trabalhos que discutem “sequenciamento verde” e estratégias de inserção de produtos sustentáveis em cadeias produtivas também ressaltam a importância de alinhar aspectos técnicos, econômicos e regulatórios para viabilizar o uso contínuo de materiais secundários. Superar tais obstáculos exige políticas públicas integradas, incentivos fiscais e programas de pesquisa contínuos que articulem universidades, setor privado e órgãos reguladores. O fortalecimento dessas parcerias é essencial para transformar o reaproveitamento de rejeitos em uma prática consolidada e economicamente competitiva (Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022).

Em síntese, as pesquisas e iniciativas voltadas ao reaproveitamento de rejeitos ricos em sílica representam uma das frentes mais promissoras para o avanço da sustentabilidade na mineração. Estudos técnico-científicos sobre *ore-sand* e sobre o aproveitamento de rejeitos silicosos em materiais cimentícios e geopoliméricos demonstram que é possível conciliar eficiência produtiva, inovação tecnológica e responsabilidade ambiental, criando um ciclo produtivo mais fechado e regenerativo (Duarte; Lameiras, 2022; Golev et al., 2022). Paralelamente, iniciativas corporativas de reaproveitamento de rejeitos em produtos como areia sustentável e agregados para construção civil indicam que essa agenda já vem sendo incorporada por empresas do setor, com potencial de geração de novos negócios e oportunidades sociais nas regiões mineradoras. Assim, o reaproveitamento de rejeitos de sílica consolida-se, na literatura e na prática, como um vetor estratégico na transição para uma mineração de baixo impacto e alto valor agregado, alinhada aos princípios da economia circular e aos desafios ambientais do século XXI (Lopes; Rodovalho; Hajj, 2022).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, com abordagem qualitativa e quantitativa com caráter descritivo-analítico, tendo como objetivo reunir, analisar e discutir informações sobre o reaproveitamento de rejeitos com alto teor de dióxido de silício (SiO_2) ou contendo frações silicosas relevantes, bem como sua inserção em cadeias produtivas sustentáveis sob a ótica da economia circular. A revisão bibliográfica foi adotada devido ao caráter emergente do tema e à necessidade de reunir informações dispersas em diferentes áreas (mineração, materiais de construção, geotecnia, sustentabilidade, entre outras), permitindo uma visão integrada sobre a viabilidade técnica, ambiental e econômica do reaproveitamento da sílica residual.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais, complementados por informações obtidas em sites de empresas e órgãos do setor mineral. Foram consultadas as bases de dados Google Acadêmico, SciELO e Periódicos CAPES, utilizando-se, em português e em inglês, combinações de palavras-chave como: rejeito de sílica; rejeitos de mineração; economia circular na mineração; *sandy tailings*; *silica-rich tailings*; construção civil.

Foram priorizadas publicações entre 2016 e 2025, com relação direta ao tema proposto, contemplando tanto estudos acadêmicos quanto iniciativas industriais de reaproveitamento de rejeitos silicosos. Os critérios de inclusão consideraram: (i) aderência ao tema (rejeitos ricos em SiO_2 ou frações silicosas de rejeitos de mineração e sua aplicação em novas cadeias produtivas); (ii) apresentação de dados técnicos mínimos (composição química, propriedades físicas, rotas de aplicação, desempenho em uso); e (iii) diálogo explícito com princípios de sustentabilidade e/ou economia circular. Foram excluídos trabalhos com foco exclusivamente em outros tipos de rejeitos (por exemplo, predominantemente sulfetados, orgânicos ou radioativos) ou que não apresentassem informações técnicas suficientes para subsidiar a análise proposta.

Além da revisão bibliográfica, realizou-se uma pesquisa documental para quantificar, em escala nacional, a produção de minério, o beneficiamento e a geração de rejeitos das principais substâncias minerais brasileiras. Para isso, foram compilados dados secundários a partir das edições de 2020 a 2024 do Anuário Mineral Brasileiro, publicadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Os dados referentes ao período de 2019 a 2023 foram organizados em planilhas eletrônicas, permitindo calcular produções acumuladas, volumes de rejeitos e participações relativas por substância mineral, os quais subsidiam a discussão sobre a relevância dos rejeitos com fração silicosa, em especial aqueles associados à cadeia do minério de ferro.

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu em três etapas principais:

(i) levantamento e seleção das fontes bibliográficas e documentais relevantes, a partir dos descritores definidos e dos critérios de inclusão e exclusão;

(ii) leitura crítica e análise comparativa dos materiais encontrados, buscando identificar convergências, divergências, lacunas e tendências quanto às rotas tecnológicas de reaproveitamento, às propriedades dos rejeitos e às implicações ambientais e econômicas; e

(iii) organização e síntese dos resultados, destacando as principais aplicações potenciais, os condicionantes técnicos e as vantagens ambientais, econômicas e sociais associadas ao reaproveitamento de rejeitos com teor significativo de SiO_2 .

As conclusões foram construídas por meio de uma análise integradora das evidências encontradas, considerando o potencial de uso dos rejeitos, as implicações para a sustentabilidade, a aderência aos princípios da economia circular

e as principais lacunas identificadas na literatura. Essa metodologia permitiu compreender, de forma articulada, as potencialidades e limitações do uso de rejeitos silicosos em diferentes setores produtivos, contribuindo para a discussão sobre a transição da mineração em direção a modelos mais sustentáveis e circulares.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica, aliados ao levantamento de dados oficiais, indicaram que a mineração de ferro continua sendo a principal responsável pela geração de rejeitos com elevada fração silicosa no contexto brasileiro. Esses rejeitos são especialmente abundantes nas regiões mineradoras de Minas Gerais, com destaque para o Quadrilátero Ferrífero, onde o beneficiamento do minério de ferro produz grandes volumes de material fino predominantemente composto por quartzo.

Com base nas estatísticas consolidadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), disponíveis no Anuário Mineral Brasileiro (edições de 2020 a 2024), foram compilados dados para o período de 2019 a 2023, considerando cinco cadeias minerais: alumínio, cobre, ferro, ouro e nióbio. Em conjunto, essas substâncias totalizaram aproximadamente 3,9 bilhões de toneladas de produção bruta (ROM), das quais cerca de 2,2 bilhões de toneladas foram efetivamente submetidas a beneficiamento. Como resultado, estima-se a geração acumulada de aproximadamente 1,7 bilhão de toneladas de rejeitos no intervalo analisado, distribuídos entre as diferentes cadeias minerais.

Tabela 1 - Produção bruta (ROM), produção beneficiada, rejeitos acumulados e Teor por substância mineral no Brasil (2019–2023).

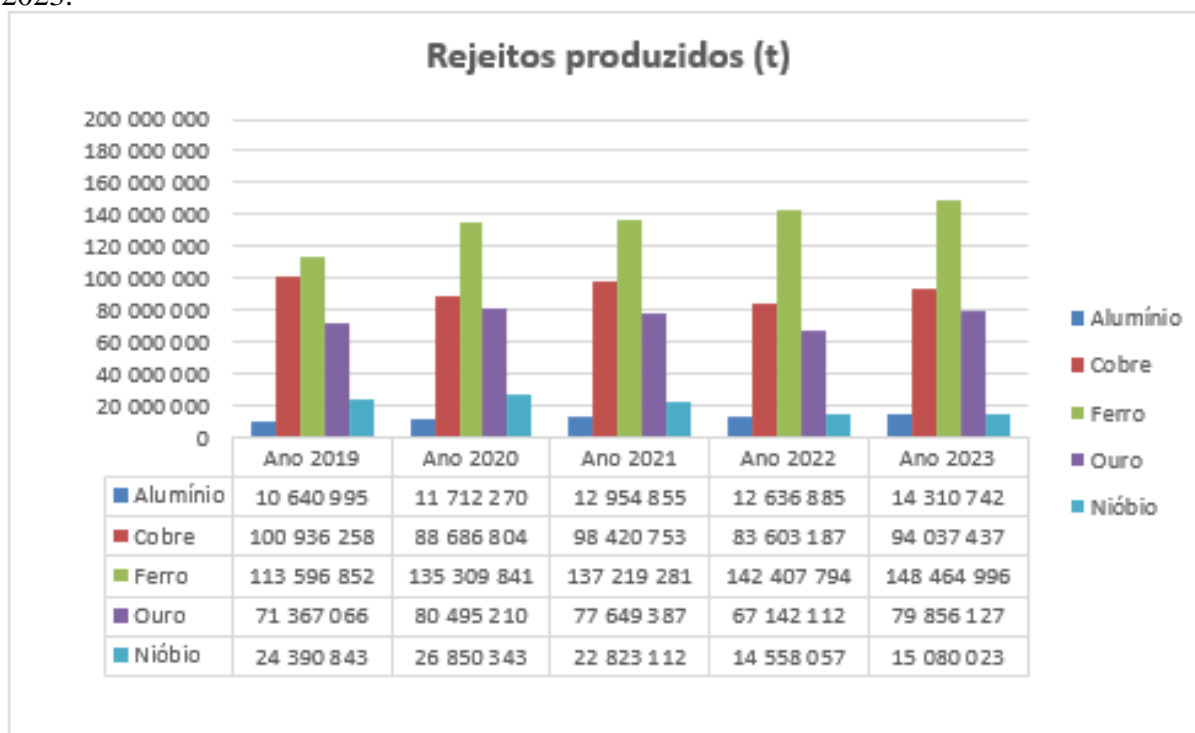
Minério	Acumulado		Rejeitos (t)	Teor (% Au em g/t)
	Produção bruta (ROM) (t)	Produção beneficiada (t)		
Alumínio	218 780 139	156 524 392	62 255 747	45,754
Cobre	471 574 868	5 890 429	465 684 439	0,563
Ferro	2 737 530 549	2 060 531 785	676 998 764	54,416
Ouro	376 829 189	319 287	376 509 902	0,909
Nióbio	104 723 001	1 020 623	103 702 378	0,974

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (Anuário Mineral Brasileiro, 2024)

A análise da Tabela 1 mostra que o minério de ferro é, isoladamente, o maior

gerador de rejeitos entre as substâncias avaliadas, acumulando cerca de 677 milhões de toneladas no período de 2019 a 2023, o que corresponde a aproximadamente 40% do total de rejeitos estimado para o conjunto analisado. Na sequência, destacam-se as cadeias de cobre, com cerca de 465 milhões de toneladas (aproximadamente 27,6%), e ouro, com cerca de 377 milhões de toneladas (aproximadamente 22,3%). O nióbio contribui com cerca de 103 milhões de toneladas (cerca de 6,2%), enquanto o alumínio responde por aproximadamente 62 milhões de toneladas (cerca de 3,7%).

Figura 1 - Gráfico de rejeitos produzidos (t) por substância mineral no Brasil entre 2019 e 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (Anuário Mineral Brasileiro, 2024)

É importante destacar que esses volumes de rejeitos não são compostos exclusivamente por sílica. Em várias cadeias minerais, sobretudo em cobre e ouro, os rejeitos apresentam composição mais heterogênea, com presença expressiva de sulfetos, argilas, minerais de ganga diversos e outros óxidos. No contexto deste Trabalho de Conclusão de Curso “Reaproveitamento de Rejeito de SiO₂ em Cadeia Produtiva Sustentável: uma revisão sob a ótica da economia circular” esses dados são utilizados como base para dimensionar o volume global de rejeitos gerados e, dentro desse universo, identificar quais cadeias oferecem maior potencial de

reaproveitamento de frações ricas em dióxido de silício (SiO_2).

A tendência temporal dos rejeitos de minério de ferro é detalhada na Figura 2. Entre 2019 e 2023, os volumes anuais passaram de aproximadamente 113,6 milhões de toneladas para cerca de 148,5 milhões de toneladas, representando um aumento da ordem de 30% no período analisado.

Figura 2 - Gráfico de rejeitos de ferro (t) no Brasil entre 2019 e 2023



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (Anuário Mineral Brasileiro, 2024)

Embora os rejeitos de ferro não sejam compostos apenas por sílica, a literatura evidencia que uma parcela significativa desse material corresponde à ganga quartzosa associada aos itabiritos, com teores médios de ferro em torno de 54% e elevada proporção de SiO_2 na fração de rejeitos. Essa combinação de grande volume gerado e presença expressiva de sílica explica por que a cadeia do ferro se destaca quando se discute o reaproveitamento de rejeitos silicosos em cadeias produtivas sustentáveis.

No nível mineralógico, as publicações analisadas mostram que os rejeitos arenosos oriundos do beneficiamento de minério de ferro apresentam, em geral, elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) e baixa concentração de outros óxidos, o

que os torna menos contaminantes e potencialmente reaproveitáveis. Estudos sobre *sandy tailings* indicam que essa fração pode conter entre 85% e 95% de SiO₂, com predominância de quartzo fino e apenas uma parcela minoritária de óxidos de ferro e alumínio, normalmente abaixo de 5%–15% em massa, a depender da jazida e do circuito de beneficiamento adotado (Duarte; Lameiras, 2022; Golev *et al.*, 2022). Essa combinação de alta pureza silicosa, baixa periculosidade química e composição mineralógica relativamente simples reforça o enquadramento desses materiais como candidatos naturais à utilização em aplicações construtivas, cimentícias e geopoliméricas, desde que atendidos os requisitos granulométricos e de desempenho estabelecidos pelas normas técnicas.

Mesmo assim, a prática predominante no país ainda é o armazenamento desses materiais em barragens de rejeitos e pilhas de rejeito filtrado, resultando em impactos ambientais e na ocupação de grandes áreas. Levantamento realizado para vinte minas de minério de ferro com produção acima de 800.000 t/ano no Quadrilátero Ferrífero mostrou que, apenas no ano de 2015, a mineração e o processamento geraram cerca de 300 milhões de toneladas de resíduos, dos quais 183 Mt corresponderam a estéreis e 112 Mt (aproximadamente 70 Mm³) a rejeitos finos, totalizando 295 Mt de materiais dispostos em estruturas de contenção. No mesmo estudo, foi registrada a existência de 157 depósitos (entre pilhas de estéril e barragens de rejeito) com acumulação próxima de 6 bilhões de toneladas de resíduos. Esses números evidenciam a magnitude dos volumes atualmente estocados e reforçam a necessidade de desenvolver e implementar rotas tecnológicas de reaproveitamento e modelos de economia circular capazes de reduzir a dependência de novas áreas de disposição, mitigar riscos geotécnicos e diminuir os passivos ambientais associados às estruturas de armazenamento (Beraldo, 2020).

A revisão da literatura e dos relatórios corporativos mostrou que a sílica residual presente nos rejeitos de minério de ferro já vinha sendo reaproveitada em diferentes cadeias produtivas, sobretudo na construção civil e na pavimentação (AGERA, 2023). No Brasil, a areia sustentável produzida pela Vale e comercializada pela Agera, a partir de rejeitos basicamente compostos por sílica, destinou cerca de 900 mil toneladas de areia de mineração à construção civil e a projetos de pavimentação entre 2021 e 2023 (AGERA, 2023) com projeção de alcançar 1 milhão de toneladas em 2023 e 2,1 milhões em 2024. Considerando um consumo nacional

em torno de 330 milhões de toneladas de areia por ano, esses volumes ainda corresponderam a menos de 1% da demanda brasileira, mas indicaram um movimento concreto de substituição parcial da areia natural por um insumo derivado de rejeitos, reduzindo simultaneamente a necessidade de novas áreas de disposição.

Além da areia coproduzida, foram identificadas iniciativas de transformação direta dos rejeitos arenosos em artefatos de concreto. A Fábrica de Blocos do Pico, instalada em 2020 em Itabirito (MG), utilizou aproximadamente 30.000 t/ano de rejeitos de minério de ferro como principal matéria-prima para produzir cerca de 3,8 milhões de blocos e pisos intertravados por ano, destinados a obras de alvenaria e pavimentação na região (VALE 03, 2022). Em testes de pavimentação rodoviária, a própria Vale reportou que cada quilômetro de rodovia construída com areia sustentável pode consumir até 7.000 t de rejeitos (Schenk, 2024), evidenciando o elevado potencial de absorção desse material em obras de infraestrutura. Com base no conjunto de estudos e casos mapeados nesta revisão, observou-se que aproximadamente dois terços dos exemplos de reaproveitamento de rejeitos ricos em sílica concentraram-se na produção de agregados para concretos, argamassas e pré-moldados, cerca de um quarto em aplicações de pavimentação (misturas asfálticas e blocos intertravados) e a parcela restante em ligantes alternativos e materiais de maior valor agregado, como geopolímeros e materiais vítreos. Essa distribuição reforçou que, embora ainda incipiente frente ao volume total de rejeitos gerados, o reaproveitamento da sílica residual já constituía uma prática concreta e em expansão no país, alinhada aos princípios da economia circular discutidos neste trabalho.

À luz da revisão realizada, verificou-se que as principais rotas de reaproveitamento da sílica residual identificadas produção de areia artificial (ore-sand), uso como agregado em blocos, concretos e argamassas, fabricação de artefatos pré-moldados e aplicação em camadas de pavimentação e ligantes alternativos deixaram de ser apenas possibilidades teóricas e já vinham sendo testadas e, em alguns casos, implementadas em escala piloto e industrial. Estudos técnico-científicos demonstraram que esses materiais apresentaram desempenho compatível com as exigências normativas, enquanto relatórios corporativos de mineradoras e de empresas voltadas à comercialização de areia de mineração registraram a destinação de centenas de milhares de toneladas de rejeitos silicosos

para a construção civil e para obras de infraestrutura. Esses exemplos concretos materializaram o conceito de mineração circular, na medida em que parte do fluxo de rejeitos deixou de ser depositada exclusivamente em barragens e pilhas e passou a ser reinserida no ciclo produtivo como matéria-prima secundária, substituindo agregados naturais e contribuindo para a redução dos volumes estocados. Em termos conceituais, o movimento observado representa uma mudança de paradigma: antes, o rejeito era predominantemente tratado como passivo a ser contido; agora, uma fração crescente é convertida em produto útil, dando origem a novos materiais e aplicações e sinalizando avanços rumo a operações mais sustentáveis. Essa mudança serve de base para os Resultados e Discussões deste trabalho, pois os dados levantados permitem discutir a mineração circular de forma concreta, a partir de exemplos reais de reaproveitamento da sílica residual em cadeias produtivas de grande relevância.

A análise dos estudos avaliados indica que o reaproveitamento da sílica residual tende a produzir benefícios ambientais e produtivos derivados diretamente das aplicações testadas na literatura. Trabalhos como o de (Golev et al., 2022) mostraram que materiais classificados como *ore-sand*, com teores de 85% a 95% de SiO_2 , puderam substituir a areia natural em concretos, argamassas e camadas de pavimentação, reduzindo a necessidade de extração de agregados primários e, simultaneamente, diminuindo o volume de rejeitos destinados ao depósito. Resultados semelhantes foram observados nos estudos de (Duarte; Lameiras, 2022), nos quais a incorporação de rejeitos silicosos em ligantes alternativos e geopolímeros contribuiu para a criação de novos materiais com desempenho mecânico satisfatório, evidenciando que o resíduo pode ser reinserido no ciclo produtivo. Já Gomes, Furtado e Souza (2018) verificaram que rejeitos arenosos com elevada fração de quartzo apresentaram comportamento adequado para uso em produtos cimentícios de baixa emissão, reforçando o potencial de valorização desse tipo de material. Em conjunto, essas evidências sugerem que o reaproveitamento da sílica residual configura um movimento alinhado aos princípios da mineração circular, ao transformar uma fração que anteriormente era destinada a barragens ou pilhas em insumos capazes de gerar novos produtos e reduzir pressões sobre recursos naturais.

As evidências reunidas na revisão sugerem que as iniciativas de reaproveitamento da sílica residual apresentam forte convergência com os princípios

da economia circular, uma vez que introduzem formas concretas de reinserção de materiais no ciclo produtivo. Estudos como o de (Golev et al., 2022) mostraram que frações arenosas de rejeitos com 85%–95% de SiO_2 foram utilizadas como substituintes da areia natural em concretos, argamassas e camadas de pavimentação, indicando que parte desse material, antes destinado a barragens ou pilhas, pode ser transformado em insumo para novos produtos. De modo semelhante, (Duarte; Lameiras, 2022) identificaram que rejeitos silicosos empregados em geopolímeros e ligantes alternativos resultaram em materiais com desempenho mecânico adequado, evidenciando outro exemplo de reinserção produtiva. Já os resultados apresentados por Gomes, Furtado e Souza (2018) mostram que rejeitos quartzosos utilizados em formulações cimentícias de baixa emissão podem reduzir tanto o consumo de recursos naturais quanto a necessidade de descarte. Consideradas em conjunto, essas iniciativas indicam que a valorização da sílica residual representa uma rota tecnicamente consistente para reduzir desperdícios, prolongar o ciclo de vida dos materiais e ampliar a eficiência do uso de recursos, aspectos centrais na discussão dos resultados deste estudo.

5. CONCLUSÃO

A partir da revisão bibliográfica e do levantamento de dados oficiais, conclui-se que os rejeitos ricos em dióxido de silício (SiO_2), especialmente aqueles associados à cadeia do minério de ferro, representam simultaneamente um relevante passivo ambiental e uma oportunidade concreta para a mineração brasileira. Os dados do Anuário Mineral Brasileiro para o período de 2019 a 2023 mostraram a magnitude da geração de rejeitos, sendo a cadeia do minério de ferro responsável por cerca de 40% do total estimado para alumínio, cobre, ferro, ouro e nióbio, com bilhões de toneladas já acumuladas em barragens e pilhas, sobretudo no Quadrilátero Ferrífero. Ao mesmo tempo, muitos desses rejeitos apresentam teores entre 85% e 95% de SiO_2 e baixa periculosidade química, o que indica elevado potencial de reaproveitamento em rotas alinhadas à economia circular.

A literatura e os casos práticos analisados demonstraram que a sílica residual já vem sendo estudada e aplicada em diferentes rotas tecnológicas, como produção de areia artificial (*ore-sand*), uso como agregado em concretos, argamassas, blocos, pré-moldados, camadas de pavimentação e formulação de ligantes alternativos,

como geopolímeros. Quando adequadamente classificados, desaguados e controlados quanto à granulometria e às impurezas, esses materiais podem atender às especificações normativas e alcançar desempenho competitivo, com geopolímeros à base de rejeitos silicosos atingindo resistências superiores a 40 MPa. Iniciativas industriais, como a Fábrica de Blocos do Pico e a produção de areia sustentável em operações da Vale em Minas Gerais, já destinam centenas de milhares de toneladas de rejeitos arenosos para a construção civil e a pavimentação, ainda que esses volumes representem apenas uma fração do total gerado.

À luz dos princípios de economia circular, os resultados indicam que tais rejeitos não devem ser vistos apenas como resíduos inevitáveis, mas como fonte potencial de matéria-prima capaz de reduzir a necessidade de novas áreas de disposição, prolongar a vida útil das jazidas, diminuir o consumo de agregados naturais e aliviar a pressão sobre ecossistemas aquáticos e terrestres. Persistem, contudo, barreiras importantes, como a ausência de normatização específica, desafios logísticos, custos adicionais de beneficiamento e resistência do mercado em aceitar produtos derivados de rejeitos, além da percepção social que ainda associa esses materiais apenas a risco e passivo. Assim, conclui-se que a consolidação do reaproveitamento em larga escala dependerá da combinação entre políticas públicas, incentivos econômicos, inovação tecnológica e articulação entre empresas, universidades e órgãos reguladores. Recomenda-se, por fim, que futuras pesquisas aprofundem o desempenho de longo prazo dos materiais desenvolvidos, avaliem a viabilidade econômica em diferentes escalas e explorem novas rotas para frações silicosas ainda pouco estudadas, de modo a apoiar a transição para uma mineração mais circular, segura e socialmente responsável.

REFERÊNCIAS

AGERA. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.conexaomineral.com.br/noticia/3595/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

AMARANTE, Jose Luiz. HISTÓRICO DA MINERAÇÃO. [s. l.], 2017.

ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, Publicado em 14/06/2017 17h01 Atualizado. **Anuário Mineral Brasileiro**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro>. Acesso em: 16 nov. 2025.

BERALDO, Antonio Ludovico. **Utilização de resíduos agroindustriais na construção**. [S. l.]: SciELO - Editora da Unicamp, 2020.

DUARTE, Glaucia Marcossi Cardoso; LAMEIRAS, Fernando Soares. Challenges for the Destiny of Iron Mining Tailings in the Iron Quadrangle of Minas Gerais, Brazil. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2022. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4455>. Acesso em: 7 nov. 2025.

GOLEV, Artem *et al.* **Ore-sand: A potential new solution to the mine tailings and global sand sustainability crises: Final report**. Brisbane, Australia; Geneva, Switzerland: The University of Queensland; The University of Geneva, 2022. Disponível em: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:503a3fd>. Acesso em: 7 nov. 2025.

IBRAM, Instituto Brasileiro de. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. [S. l.]: Ibram, 2016.

LIMA, Douglas Souza. ANÁLISE DO ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS. [s. l.],

LOPES, Pedro Paulo; RODOVALHO, Edmo da Cunha; HAJJ, Thammiris Mohamad El. Brazilian mining sector and its environmental impact: a review of cradle-to-cradle options applied to residues, waste and tailings. **HOLOS**, [s. l.], v. 6, 2022. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/9413>. Acesso em: 18 nov. 2025.

LOPES, Pedro Paulo; RODOVALHO, Edmo Da Cunha; MOHAMAD EL HAJJ, Thammiris. Brazilian mining sector and its environmental impact: a review of cradle-to-cradle options applied to residues, waste and tailings. **HOLOS**, [s. l.], v. 6, 2022. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/9413>. Acesso em: 7 nov. 2025.

SCHENK, Ana Carolina Dias. Vale quer recuperar 7 Mt de minério de ferro com reaproveitamento de rejeitos. *In*: REVISTA MINERAÇÃO. 13 set. 2024. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2024/09/13/vale-recuperar-minerio-de-ferro-reaproveitamento-rejeitos/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

VALE. Vale inaugura fábrica que transforma rejeitos da mineração em produtos para a construção civil. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-inaugura-f%C3%A1brica-que-transforma-rejeitos-da-minera%C3%A7%C3%A3o-em-produtos-para-a-constru%C3%A7%C3%A3o-civil>. Acesso em: 2 nov. 2025.

VALE 03. Areia Sustentável da Vale aumenta a vida útil e reduz os custos de pavimentação asfáltica. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/areia-sustent%C3%A1vel-da-vale-aumenta-a-vida-%C3%BAtil-e-reduz-os-custos-de-pavimenta%C3%A7%C3%A3o-asf%C3%A1ltica>. Acesso em: 18 nov. 2025.

VALE 08. Vale amplia produção de Areia Sustentável em Minas Gerais - Vale. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-amplia-producao-de-areia-sustentavel-em-minas-gerais>. Acesso em: 16 nov. 2025.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A Sílica e suas Particularidades
Gomes, LS. 2018.