



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Bárbara Luiza Kattah Silva

Rotas de valorização dos resíduos da mineração de
ferro: uma revisão sistemática da literatura

Ouro Preto

2026

Bárbara Luiza Kattah Silva

Rotas de valorização dos resíduos da mineração de ferro: Uma
revisão sistemática da literatura

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do Grau de Engenharia Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Dr. Guilherme Jorge Brigolini
Silva

Coorientador: Me Matheus Henrique Dela
Costa Ferreira

Ouro Preto

2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bárbara Luiza Kattah Silva

Rotas de valorização dos resíduos da mineração de ferro: Uma revisão sistemática da literatura

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em 03 de junho de 2026

Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Matheus Henrique Dela Costa Ferreira - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
D^a Laís Cristina Barbosa Costa - Universidade Federal do Ceará
Dr. José Agenor Carvalho Júnior - Universidade Federal de Ouro Preto

Guilherme Jorge Brigolini Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/06/2026



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/06/2026, às 21:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1125224** e o código CRC **AAF61A8E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Professor Guilherme pela disponibilidade e conhecimentos compartilhados. Ao meu coorientador, Matheus, expresso minha profunda gratidão por todo suporte e pelas poucas, mas longas e fundamentais conversas que me guiaram para a realização deste trabalho. Aos meus pais, Denise e Eduardo, e meu irmão, Matheus, agradeço o apoio incondicional, incentivo e suporte ao longo dessa etapa e toda a minha trajetória acadêmica. Ao Didácio, por acreditar em mim, me apoiar, me motivar e, mesmo quando distante, se fazer presente durante essa caminhada. À Sky, pela companhia durante as longas horas de estudo, tornando os momentos difíceis mais leves. Ao Grupo Reciclos, que, ainda em 2022, me proporcionou a oportunidade de compreender a importância do reaproveitamento e sustentabilidade, despertando meu interesse pelo tema. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

RESUMO

A mineração de ferro exerce papel fundamental na economia brasileira, mas também gera grandes volumes de resíduos, cuja disposição em pilhas e barragens representa desafios ambientais, técnicos e sociais. Diante dos impactos associados à produção desses materiais, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre as formas de aproveitamento e aplicações de resíduos provenientes da mineração de ferro. Para isso, a metodologia foi estruturada conforme as diretrizes PRISMA, utilizando a base Scopus para a busca de artigos publicados entre 2011 e 2025. Após os processos de triagem, foram selecionados 50 trabalhos para análise. Os resultados demonstraram que a produção científica sobre o tema está concentrada principalmente na China e no Brasil, com destaque para aplicações na construção civil. Observou-se que o rejeito arenoso é o tipo de resíduo mais estudado, devido à sua compatibilidade com agregados naturais, enquanto as lamas e rejeitos ultrafinos apresentam potencial para aplicações que exigem ativação química, mecânica ou térmica. O estéril, embora gerado em grande volume, ainda aparece de forma pouco expressiva na literatura, indicando uma lacuna relevante de pesquisa. Também foi identificado que a heterogeneidade dos resíduos influencia diretamente sua viabilidade de aplicação, tornando indispensável a caracterização prévia de cada material. Além disso, a co-utilização com outros resíduos industriais, como cinzas volantes, escórias e lama vermelha, mostrou-se uma estratégia promissora para melhorar o desempenho técnico dos produtos e ampliar os benefícios ambientais. Conclui-se que os resíduos da mineração de ferro apresentam elevado potencial de reaproveitamento como matérias-primas secundárias, contribuindo para a redução da disposição final, a preservação de recursos naturais e a reinserção desses materiais em novos ciclos produtivos. No entanto, ainda são necessários estudos em escala piloto para viabilizar sua aplicação em escala industrial.

Palavras-chaves: resíduo de minério de ferro, RMF, rejeitos, reaproveitamento, economia circular, material de construção, aproveitamento de resíduos, sustentabilidade, PRISMA

ABSTRACT

Iron ore mining plays a fundamental role in the Brazilian economy, but it also generates large volumes of waste, whose disposal in piles and dams represents environmental, technical, and social challenges. Given the impacts associated with the production of these materials, this study aimed to conduct a systematic review of the scientific literature on the forms of reuse and applications of waste generated from iron ore mining. To achieve this, the methodology was structured according to the PRISMA guidelines, using the Scopus database to search for articles published between 2011 and 2025. After the screening process, 50 studies were selected for analysis. The results showed that scientific production on this topic is mainly concentrated in China and Brazil, with emphasis on applications in the construction sector. It was observed that sandy tailings are the most studied type of waste due to their compatibility with natural aggregates, while slurries and ultrafine tailings show potential for applications that require chemical, mechanical, or thermal activation. Waste rock, although generated in large volumes, is still scarcely addressed in the literature, indicating a relevant research gap. It was also identified that the heterogeneity of these wastes directly influences their feasibility of application, making the prior characterization of each material essential. In addition, co-utilization with other industrial wastes, such as fly ash, slags, and red mud, proved to be a promising strategy to improve the technical performance of the products and enhance environmental benefits. It is concluded that iron ore mining wastes have high potential for reuse as secondary raw materials, contributing to the reduction of final disposal, the preservation of natural resources, and the reinsertion of these materials into new productive cycles. However, pilot-scale studies are still needed to enable their application on an industrial scale.

Keywords: iron ore waste, reuse, IOT, tailings, circular economy, construction material, waste recycling, sustainability, PRISMA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases do processamento do minério de ferro utilizando a flotação.....	14
Figura 2: Processo de triagem dos artigos selecionados na base de dados.....	19
Figura 3: Número de publicações por países.....	24
Figura 4: Número de publicações nos últimos 15 anos.....	25
Figura 5: Coccorrência de palavras-chave.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição de artigos mapeados por periódicos.....	23
Tabela 2: Resíduos utilizados nos trabalhos.....	30
Tabela 3: Grupos de aplicações dos resíduos nos trabalhos.....	36
Tabela 4: Trabalhos com aproveitamento físico de resíduos da mineração de ferro em compósitos cimentícios.	38
Tabela 5: Trabalhos que exploram o potencial reativo do RMF em matrizes cimentícias.	42
Tabela 6: Trabalhos que estudam tijolos cerâmicos produzidos em sistemas de baixa temperatura ou sem queima.....	48
Tabela 7:Trabalhos que estudam a produção de argilas expandidas (<i>ceramsites</i>)...	49
Tabela 8: Trabalhos que estudam cerâmicas porosas funcionais.....	51
Tabela 9: Estudos alternativos de aplicação do RMF	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. OBJETIVO	12
1.1.1. Objetivos específicos.....	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. PROCESSAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO	13
2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO	15
2.3. ECONOMIA CIRCULAR.....	16
3. METODOLOGIA	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	23
4.1.1. Periódicos.....	23
4.1.2. Origem das publicações	24
4.1.3. Palavras chaves	26
4.2. HETEROGENEIDADE DOS MATERIAIS	28
4.3. RESÍDUOS APROVEITADOS.....	30
4.3.1. Estéril.....	30
4.3.2. Lama / Rejeito ultrafino	32
4.3.3. Rejeito arenoso.....	34
4.4. POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO	36
4.4.1. Compósitos cimentícios	37
4.4.2. Compósitos cerâmicos	47
4.4.3. Outras aplicações	56
4.5. CO-UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS E GANHO AMBIENTAL.....	61
5. CONCLUSÃO	65

REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE A – TRABALHOS ANALISADOS.....	78

1. INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental na economia brasileira. Segundo dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o setor mineral atingiu um faturamento acima de R\$ 270 bilhões em 2024, sendo responsável por quase metade do saldo financeiro gerado pelo país no mesmo ano. Também foi responsável por gerar mais de 220 mil empregos diretos, mantendo-se como uma das principais fontes de geração de riqueza no Brasil (IBRAM, 2024). Considerando os minerais explorados, o minério de ferro se destaca como a base da mineração nacional, sendo responsável por mais de 60% do faturamento total do setor (ANM, 2025).

Para atender as demandas do setor, o elevado volume de produção é resultado da atuação de várias mineradoras distribuídas em diferentes regiões do país, especialmente nos estados de Minas Gerais e Pará (IBRAM, 2024). Em todas essas operações, o material extraído precisa passar por processos industriais com objetivo de atender a requisitos químicos e físicos para que o minério esteja apto à comercialização (Luz, *et al.*, 2010). Na fase inicial da lavra, são removidas camadas de solo e rocha sem valor econômico, formando o material chamado estéril. Após a extração do minério, ele é levado para as plantas industriais onde passa pelo processo de beneficiamento. É justamente durante o beneficiamento que são gerados os rejeitos de minério de ferro (RMFs) (Gontijo, 2021; Luz; Lins, 2010).

Para dar destino aos resíduos, as mineradoras utilizam principalmente estruturas como pilhas e barragens, ambas amplamente empregadas no Brasil (CNMP, 2021). Entretanto, o volume produzido torna essa etapa um desafio, visto que estima-se que, ao final do processamento, os rejeitos correspondam a aproximadamente 20–40% do peso total do minério de ferro extraído (Matiolo *et al.*, 2020). Considerando que a atividade minerária já apresenta impactos ambientais associados, como supressão de vegetação, alteração da paisagem e mudanças hidrológicas, a própria forma de disposição dos resíduos também pode representar riscos (Gusmão *et al.*, 2021).

Os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos resultantes do rompimento de barragens de rejeitos, ilustram de maneira trágica essa problemática,

tendo causado perdas humanas e danos ambientais significativos. Além desses casos amplamente conhecidos, outro acidente envolvendo pilha de rejeito evidencia que o risco não está limitado às barragens. Em Nova Lima (MG), em 2022, uma pilha da Vallourec sofreu colapso após fortes chuvas, gerando um fluxo de lama que atingiu a BR-040 e interrompeu o tráfego em alguns trechos, mobilizando órgãos de emergência e inundando áreas de conservação ambiental (ALMG, 2022).

Diante desses cenários, a Agência Nacional de Mineração (ANM) intensificou a regulamentação sobre disposição de rejeitos, resultando na proibição do método de alteamento a montante para barragens, na obrigatoriedade de monitoramento geotécnico contínuo e na realização de análises de risco periódicas (ANM, 2022). Paralelamente, órgãos ambientais e secretarias estaduais reforçaram exigências relacionadas às diretrizes técnicas e à conformidade ambiental das atividades minerárias, garantindo que essas estruturas não representem risco para áreas sensíveis, cursos d'água e unidades de conservação (FEAM, 2023).

Esse novo contexto regulatório rígido, associado à crescente pressão social por sustentabilidade, tem impulsionado a busca por soluções que vão além da melhoria nas formas de disposição. Ele tem estimulado o avanço de pesquisas e tecnologias voltadas ao reaproveitamento dos resíduos da mineração, permitindo não apenas reduzir riscos ambientais, mas também transformar materiais que seriam descartados em insumos para diferentes cadeias produtivas. Essa mudança de perspectiva se alinha aos princípios da economia circular, que propõe a reinserção contínua de materiais nos ciclos produtivos, reduzindo a dependência de novos recursos naturais e mitigando impactos ambientais (Ellen Macarthur Foundation, 2015).

Apesar do avanço significativo das pesquisas e do crescente interesse no reaproveitamento dos rejeitos da mineração de ferro, ainda há uma compreensão insuficiente sobre as diferentes formas pelas quais esses resíduos podem ser efetivamente reinseridos em cadeias produtivas. Diante desse contexto, este trabalho é orientado pela seguinte pergunta: quais são os principais estudos e aplicações existentes para o reaproveitamento dos resíduos da mineração de ferro? Parte-se da premissa de que a literatura científica mostra que os resíduos podem ser incorporados em produtos da construção civil, em processos de remediação ambiental, em reforços

de solos e como matérias-primas para outras tecnologias (Almeida *et al.*, 2025; Araujo *et al.*, 2022; Carmignano *et al.*, 2021; Khamseh *et al.*, 2025).

Entretanto esse aproveitamento ainda se encontra limitado por barreiras tecnológicas, econômicas e por lacunas de conhecimento científico. Assim, espera-se que esta revisão da literatura permita não apenas identificar aplicações já consolidadas, mas também evidenciar tendências emergentes e oportunidades futuras para a valorização desses resíduos.

1.1.OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sistemática da literatura científica sobre as formas de aproveitamento e aplicações de resíduos provenientes da mineração de ferro.

1.1.1. Objetivos específicos

- Realizar uma análise bibliométrica dos trabalhos selecionados;
- Classificar os tipos de resíduos utilizados nas pesquisas, conforme sua origem durante a extração e beneficiamento;
- Identificar as principais aplicações tecnológicas desenvolvidas para esses resíduos;
- Mapear quais são as principais áreas da indústria que se beneficiam ou podem se beneficiar do uso desses resíduos;
- Discutir como as características físicas e químicas dos resíduos influenciam seu desempenho e sua viabilidade de reaproveitamento;
- Analisar o papel do reaproveitamento dos resíduos da mineração do minério de ferro à luz dos princípios da economia circular.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho, a fundamentação teórica tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais para o entendimento do tema e para a contextualização técnica do aproveitamento dos resíduos da mineração de ferro. Este capítulo aborda os aspectos relacionados ao beneficiamento do minério de ferro, à caracterização dos rejeitos e aos princípios da economia circular, que constituem a base conceitual para a pesquisa. A análise detalhada da literatura, voltada à identificação e discussão dos estudos sobre a apresentação do estado da arte recente, será desenvolvida posteriormente no Capítulo 4, conforme a abordagem metodológica da revisão sistemática adotada.

2.1. PROCESSAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO

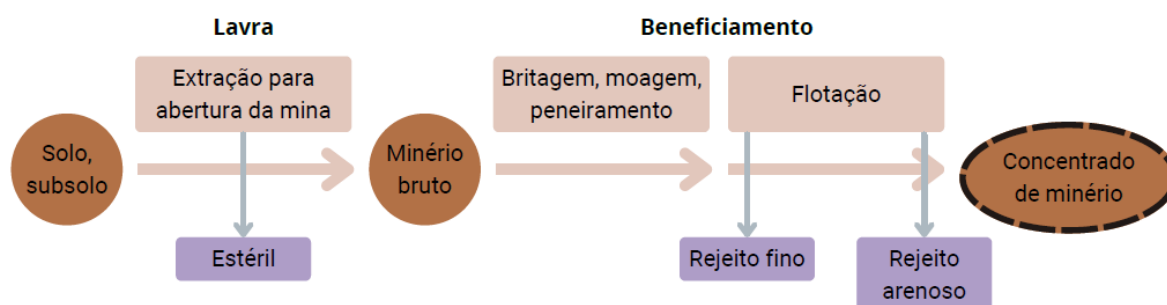
Para que o minério de ferro esteja apto à comercialização, é necessário que atenda a requisitos de mercado, como teores mínimos de ferro (Fe), baixa concentração de impurezas como fósforo (P), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), além de características físicas adequadas, como a granulometria (Araujo; Viana; Peres, 2004; Zhang *et al.*, 2025). Entretanto, o minério extraído diretamente das cavas raramente satisfaz essas especificações. Dessa forma, torna-se necessária a aplicação de processos de beneficiamento, e para isso, a rota de processamento adotada pelas mineradoras depende do tipo de minério explorado (Araujo *et al.*, 2003). Depósitos ricos em hematita apresentam elevadas concentrações de ferro, frequentemente superiores a 60%, permitindo rotas de processamento mais simples (Pais, *et al.*, 2012). Por outro lado, grande parte das jazidas atualmente exploradas no Brasil é composta por minérios de baixo teor, como os itabiritos, predominantes no Quadrilátero Ferrífero (MG). Esses minérios apresentam maior associação do ferro com outros minerais como o quartzo (Araujo *et al.*, 2003; Carmignano *et al.*, 2021; Luz; Lins, 2010). Assim, o beneficiamento mineral torna-se indispensável, pois tem o objetivo principal de elevar o teor de ferro e atender às especificações do produto.

O beneficiamento do minério de ferro é dividido em etapas, entre as quais se destacam a britagem, a moagem e a concentração (Luz; Lins, 2010). A britagem tem como função a redução inicial do tamanho das partículas provenientes da lavra, adequando o minério para as etapas seguintes e facilitando seu manuseio e

transporte. Em seguida, a moagem promove uma redução adicional da granulometria, possibilitando a liberação mais eficiente dos minerais de ferro em relação aos outros minerais associados a eles. A etapa de concentração é responsável por elevar o teor de ferro do material processado e é frequentemente realizada por meio da flotação reversa catiônica, processo no qual, com o auxílio de reagentes químicos específicos, ocorre a separação da sílica da fração rica em ferro (Araujo *et al.*, 2003; Luz; Lins, 2010).

Parte majoritária do tratamento mineral é realizada por via úmida, fazendo com que o uso de água se torne uma característica marcante (Luz; Lins, 2010). Após a moagem o minério de ferro atinge uma granulometria suficientemente fina, e como consequência, ocorre também a formação de uma fração significativa de partículas ultrafinas, conhecidas como lamas. A presença dessas partículas no sistema é indesejável, pois elas prejudicam a eficiência da flotação. Por isso é necessária a realização de um processo de deslamagem, cuja função é remover essas partículas ultrafinas antes da concentração (Lima; Peres; Marques, 2012). Já no processo de flotação, a água atua como meio de transporte das partículas, facilita a separação mineralógica e possibilita a diluição dos reagentes químicos (Araujo; Viana; Peres, 2004). Esse volume de água utilizado no processo resulta na formação das polpas minerais e, conseqüentemente, na geração de grandes volumes de rejeitos finos e arenosos misturados com água. (Carmignano *et al.*, 2021). Cada uma dessas etapas gera tipos específicos de resíduos, que se originam em momentos distintos do ciclo produtivo da mineração. A Figura 1 exemplifica esse processo.

Figura 1: Fases do processamento do minério de ferro utilizando a flotação.



Fonte: Adaptado de Carmignano *et al.* (2021).

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Os RMFs apresentam características que variam significativamente conforme a rota de processamento adotada, as propriedades do minério original e as tecnologias empregadas. De modo geral, podem ser classificados em rejeitos grossos e rejeitos finos, conforme sua granulometria e a etapa do processo em que são gerados (Abbadi; Mucsi, 2024). Os rejeitos finos, as lamas, são caracterizados por uma granulometria extremamente baixa. Matiolo *et al.* (2020) identificaram que esses materiais podem apresentar cerca de 99% de suas partículas com diâmetro inferior a 45 µm, com porcentagem expressiva abaixo de 10 µm e até mesmo inferiores a 1 µm. Essa granulometria resulta em alta área superficial e baixa permeabilidade e enquadrando-se predominantemente na fração argilosa. Como consequência, essas características afetam tanto os desafios relacionados à disposição, quanto o seu potencial de aplicação em usos que demandam materiais finos, como em processos de estabilização de solos (Khamseh *et al.*, 2025). Já os rejeitos grossos apresentam tamanho médio de partículas em torno de 150 µm, sendo classificados como rejeitos arenosos (Carmignano *et al.*, 2021). Devido sua granulometria mais alta, podem ser aplicados como substitutos de agregados em concretos e argamassas, contribuindo para a redução da demanda por areia natural (Kuranchie *et al.*, 2015).

Além da granulometria, a composição química e mineralógica dos RMFs constitui um fator fundamental para sua caracterização e avaliação de potencial de uso. De modo geral, esses materiais são compostos predominantemente por quartzo (SiO₂), associada a menores proporções de óxidos e hidróxidos de ferro presentes em minerais como hematita, magnetita e goethita (Almeida *et al.*, 2025; Carmignano *et al.*, 2021). Os óxidos e hidróxidos de ferro conferem coloração e estabilidade química ao material, favorecendo sua aplicação como pigmentos inorgânicos na indústria cerâmica (Carmignano *et al.*, 2021). Já a presença de minerais argilosos, como caulinita, alumina e gibbsita, amplia o potencial de reaproveitamento dos rejeitos finos, especialmente na produção de geopolímeros (Araujo *et al.*, 2022).

Nesse contexto, Araujo *et al.* (2003) destacam que “os minerais são formados por processos naturais e, portanto, são normalmente heterogêneos, e não homogêneos”, evidenciando que, mesmo após o beneficiamento, os rejeitos mantêm a heterogeneidade intrínseca dos minerais naturais. Essa condição resulta em

variações importantes nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos rejeitos, o que reforça que eles não devem ser tratados como um material único e uniforme. Ao contrário, trata-se de um conjunto diversificado de materiais, cujas diferenças condicionam diretamente tanto suas limitações técnicas quanto suas possibilidades de reaproveitamento em distintos contextos de engenharia.

Dessa forma, a caracterização adequada dos RMFs torna-se uma etapa essencial. Não apenas para a avaliação de riscos ambientais e para o entendimento do comportamento dos materiais nos locais de disposição, mas também para estabelecer relações claras entre suas propriedades e as aplicações potenciais. Essa compreensão é fundamental para orientar estudos voltados ao reaproveitamento, permitindo identificar quais características favorecem determinadas aplicações e quais limitações ainda precisam ser superadas.

2.3. ECONOMIA CIRCULAR

O modelo econômico predominante ao longo do desenvolvimento industrial tem sido baseado em uma lógica linear de produção, caracterizada pelas etapas de extração da matéria prima, transformação, comercialização e descarte (Ellen Macarthur Foundation, 2015). No contexto da mineração, essa abordagem resulta na produção e deposição do elevado volume de resíduos como discutido nos capítulos anteriores.

Diante desse cenário, a economia circular surge como um modelo econômico alternativo, que visa reduzir a geração de resíduos, propondo a manutenção do uso dos materiais pelo maior tempo possível ao longo do ciclo produtivo (Duthie; Lins, 2017). No Brasil, instrumentos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) incentivam a adoção de práticas de hábitos sustentáveis, bem como orientam ações para a não geração, redução, reutilização, reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos. A PNRS foca no reaproveitamento de materiais e na minimização da disposição final, além de estimular a responsabilidade compartilhada entre poder público, setor produtivo e sociedade (Brasil, 2010).

No setor mineral, uma das formas de se aplicar os princípios da economia circular é repensar a gestão de resíduos. Fazendo com que estéreis e rejeitos passem a ser compreendidos não apenas como materiais a serem descartados, mas como

potenciais insumos, capazes de serem reinseridos em diferentes cadeias produtivas (Duthie; Lins, 2017). Trabalhos como os de Almeida *et al.* (2025), Araujo *et al.* (2022) e Carmignano *et al.* (2021) demonstram que esses resíduos podem ser incorporados, por exemplo, na produção de materiais cimentícios, em cerâmicas, em processos de estabilização de solos, até mesmo em dispositivos elétricos, reduzindo ao mesmo tempo a demanda por matérias-primas naturais e os volumes destinados à disposição final.

Sob a perspectiva social, a implementação de estratégias de reaproveitamento pode favorecer a geração de empregos diretos e indiretos, especialmente em regiões dependentes da atividade minerária. Além disso, pode contribuir para a redução de conflitos socioambientais associados à presença de grandes estruturas de disposição. Do ponto de vista econômico, a incorporação desses resíduos como matérias-primas secundárias também pode gerar oportunidades de lucro para as empresas. Podendo agregar valor econômico a outros processos produtivos, estimular o desenvolvimento de novas cadeias industriais e impulsionar avanços tecnológicos e de pesquisas (Ellen Macarthur Foundation, 2015; OECD, 2025).

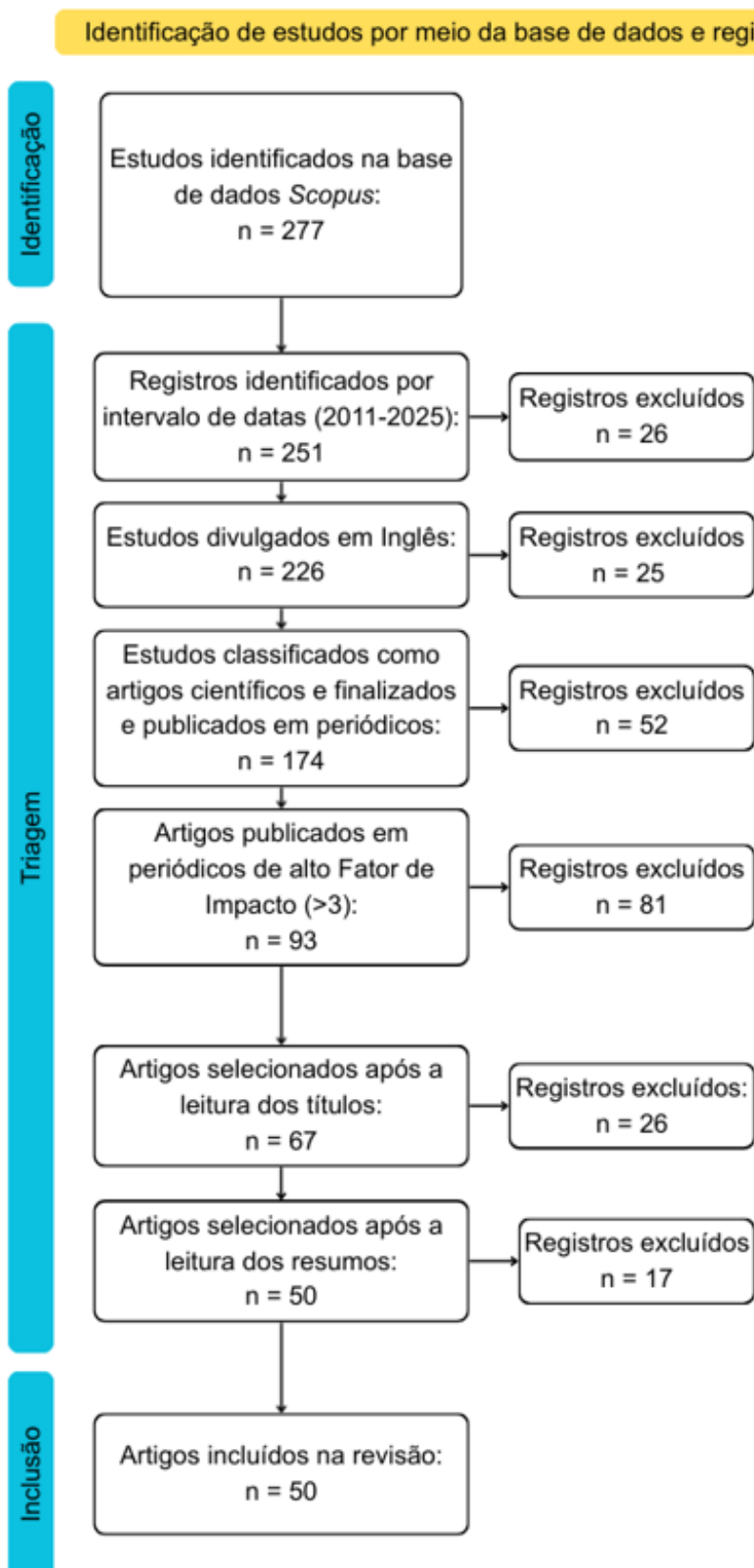
A economia circular consolida-se como um conceito essencial para a discussão sobre o reaproveitamento na mineração, ao integrar fatores ambientais, econômicos e sociais na gestão de resíduos. Nesse contexto foi identificado a necessidade de uma abordagem metodológica capaz de organizar, sistematizar e analisar criticamente os estudos já existentes a respeito do aproveitamento dos resíduos produzidos pela mineração de ferro. O objetivo é compreender o estado atual do conhecimento e identificar dificuldades no desenvolvimento de pesquisas, criando uma oportunidade de mapear soluções técnica e ambientalmente viáveis.

3. METODOLOGIA

O processo de elaboração deste trabalho consistiu em uma revisão integrativa da literatura, combinando uma abordagem bibliométrica, voltada à análise quantitativa da produção científica, e uma análise qualitativa, baseada na interpretação crítica dos estudos selecionados. Para garantir rigor metodológico, foram adotados os critérios estabelecidos pelo sistema PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Esse modelo é amplamente utilizado na condução de revisões sistemáticas de literatura, por proporcionar maior transparência, organização e reprodutibilidade ao processo de seleção e análise dos estudos (Marcondes; Silva, 2023). A aplicação dessa abordagem teve como objetivo selecionar e analisar criticamente pesquisas voltadas ao aproveitamento de resíduos provenientes da mineração de ferro, permitindo compreender tanto as tendências da produção científica quanto os principais resultados e aplicações reportados na literatura.

A Figura 2 apresenta o número de estudos identificados e selecionados em cada etapa do processo de triagem, conforme o fluxograma recomendado pelo modelo PRISMA 2020. Os trabalhos selecionados se encontram listados ao final do documento, no Apêndice A.

Figura 2: Processo de triagem dos artigos selecionados na base de dados.



Fonte: Autora.

Seguindo as etapas recomendadas em Page *et al.* (2022), inicialmente foi definida a base de dados utilizada para a busca dos estudos. Considerando critérios como confiabilidade e a presença de publicações relevantes na área da engenharia, foi considerado o site *Scopus* para a realização da busca bibliográfica. Na sequência, foram definidos os termos de busca, bem como os descritores e operadores booleanos, de modo a otimizar a identificação e a filtragem dos trabalhos mais alinhados ao objetivo da revisão. A estratégia de busca foi estruturada a partir da combinação de descritores utilizando operadores booleanos, apresentados abaixo:

("iron ore tailing" OR "iron ore waste") AND ("reuse" OR "utilization" OR "recycle")

Com a intenção de refinar a estratégia de busca, os termos foram restringidos aos campos de títulos e resumos dos documentos, sendo encontrados 277 trabalhos. Posteriormente, foram aplicados critérios de inclusão, selecionando-se apenas estudos publicados nos últimos 15 anos (2011 a 2025), redigidos em inglês ou português e classificados como artigos científicos finalizados e publicados. A partir dessa classificação foram identificados 174 artigos.

Na sequência, para assegurar maior rigor científico, realizou-se um novo filtro com base na qualidade e relevância dos periódicos, utilizando como parâmetro o *Journal Citation Reports* (JCR), sistema internacional que classifica periódicos científicos a partir do Fator de Impacto. Este é um indicador que mede a média de citações recebidas pelos artigos publicados em determinado período e é amplamente utilizado como referência de qualidade e influência acadêmica (Krampl, 2019). Assim, foram mantidos apenas estudos publicados em periódicos com JCR maior ou igual a 3, resultando na seleção de 93 artigos.

Como critérios de exclusão, após a aplicação dos filtros automáticos nas bases de dados, foi realizada uma leitura criteriosa dos títulos dos trabalhos selecionados. Nessa etapa, 26 trabalhos foram excluídos principalmente por focarem em beneficiamento mineral, como a recuperação de ferro presente no rejeito. Também foram excluídos trabalhos que não abordam o uso de resíduos do minério de ferro como insumo central, focando na utilização de outros tipos de resíduos industriais ou urbanos. A leitura dos títulos também permitiu a remoção de revisões de literatura. Resultando em 67 artigos.

Em seguida, procedeu-se à leitura dos resumos, o que resultou na exclusão adicional de 17 artigos. Foram excluídos trabalhos cujo foco principal estava em caracterização dos resíduos, que apenas indicavam potenciais de uso sem apresentar aplicação concreta. Também foram excluídos estudos cujo foco principal estava na recuperação química de elementos específicos, como ferro ou sílica. Esse critério foi adotado com base na hipótese de que tais abordagens, embora relevantes do ponto de vista tecnológico, contradizem o objetivo central deste trabalho, que é mapear aplicações capazes de consumir diretamente o rejeito, contribuindo de maneira efetiva para a mitigação dos passivos ambientais associados às áreas de disposição.

Ao final desse processo de triagem, 50 trabalhos atenderam aos critérios estabelecidos e foram selecionados para avaliação detalhada. Primeiramente foram submetidos a uma análise bibliométrica, com o objetivo de identificar padrões quantitativos da produção científica. Para a análise de coocorrência das palavras-chave, utilizou-se o software VOSviewer, que permitiu visualizar as conexões temáticas entre os estudos e identificar os principais eixos de discussão da literatura. Em seguida, após essa etapa quantitativa, foi realizada a leitura criteriosa dos 50 artigos selecionados, buscando interpretar criticamente seus objetivos, materiais utilizados, métodos, aplicações, resultados obtidos e limitações.

Diante da complexidade e da diversidade mineralógica dos materiais, os estudos selecionados foram agrupados de acordo com sua rota de produção, sendo eles classificados em três categorias: estéreis, lamas ou rejeito ultrafino e rejeitos arenosos. Essa organização teve o objetivo de auxiliar na identificação de quais resíduos da mineração de ferro têm sido explorados nas pesquisas científicas.

Como os trabalhos não especificam, em sua totalidade, a fase de processamento de origem do resíduo, foi adotado um critério de padronização. Assim, a distinção entre rejeito arenoso e lama/rejeito ultrafino foi baseada nas recomendações do *Unified Soil Classification System* (USCS) para granulometria dos solos. De acordo com esse sistema, materiais com partículas maiores que 75 µm são classificados como arenosos, enquanto aqueles com granulometria inferior a 75 µm são enquadrados como finos (ASTM, 2017).

Neste trabalho o termo “fino” foi substituído por “ultrafino”, para evitar conflitos quando os materiais são classificados como “areia fina”. Os estéreis, sempre que utilizados, foram citados em seus respectivos trabalhos, sem necessidade de uma nova classificação.

Após a classificação dos resíduos aproveitados, os estudos selecionados foram organizados de acordo com a aplicação principal investigada em cada trabalho. Essa etapa teve como objetivo sistematizar as diferentes formas de aproveitamento reportadas pela literatura, permitindo a análise dos produtos desenvolvidos a partir dos resíduos da mineração de ferro e das funções desempenhadas por esses materiais em cada aplicação. Para isso, os artigos foram classificados de acordo com a categoria de aplicação predominante em cada estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica dos 50 artigos selecionados permitiu identificar tendências e características da produção científica sobre o reaproveitamento de resíduos da mineração de ferro. Os principais resultados são apresentados a seguir.

4.1.1. Periódicos

A Tabela 1 apresenta os periódicos nos quais os 50 artigos selecionados foram publicados, bem como informações relacionadas ao fator de impacto e à quantidade de trabalhos identificados em cada revista.

Tabela 1: Distribuição de artigos mapeados por periódicos.

Periódico	JCR	Nº de Artigos
<i>Construction and Building Materials</i>	8,0	17
<i>Journal of Building Engineering</i>	7,4	7
<i>Case Studies in Construction Materials</i>	6,6	4
<i>Journal of Cleaner Production</i>	10,0	3
<i>Alexandria Engineering Journal</i>	6,8	2
<i>Journal of Materials Research and Technology (JMR&T)</i>	6,6	2
<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	7,8	2
<i>Advanced Powder Technology</i>	4,2	1
<i>Ceramics International</i>	5,6	1
<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	3,9	1
<i>Discover Materials</i>	5,1	1
<i>Environmental Research</i>	7,7	1
<i>International Journal of Sustainable Engineering</i>	3,6	1
<i>Journal of Alloys and Compounds</i>	3,6	1
<i>Journal of Environmental Management</i>	8,4	1
<i>Journal of Materials in Civil Engineering</i>	3,0	1
<i>Materials Chemistry and Physics</i>	4,7	1
<i>Polymers</i>	4,9	1
<i>Sustainable Materials and Technologies</i>	9,2	1
<i>The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology</i>	3,1	1

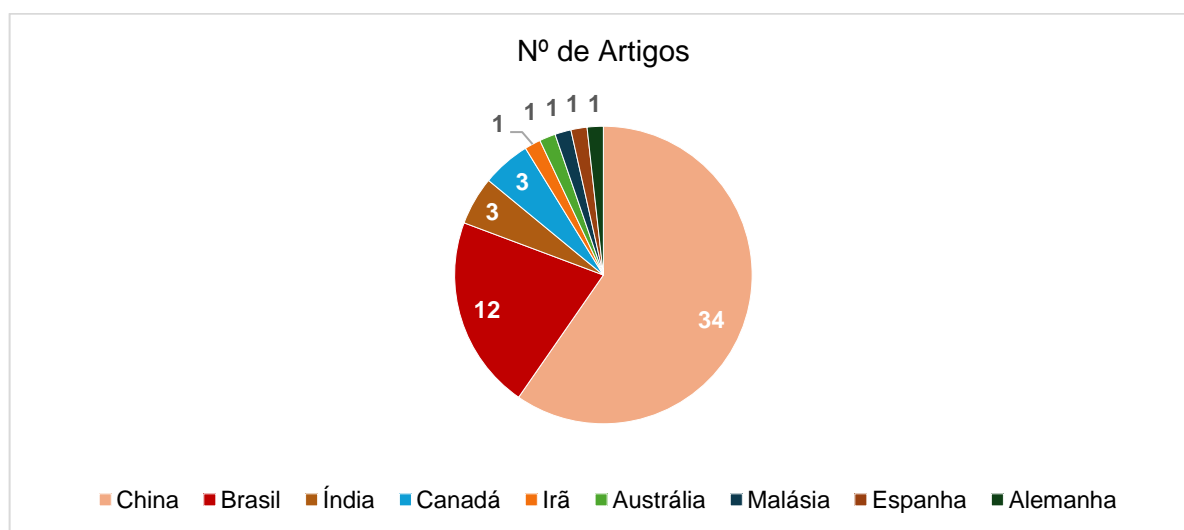
A concentração de publicações em periódicos como *Construction and Building Materials* e *Journal of Building Engineering* evidencia que o principal foco das pesquisas está direcionado à aplicação dos resíduos de minério de ferro na indústria da construção civil. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que esse setor é um dos maiores consumidores de recursos naturais, demandando grandes volumes de materiais como areia, brita, argila e cimento. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos minerais surge como uma alternativa capaz de reduzir a extração de matérias-primas naturais e, simultaneamente, oferecer uma destinação para os resíduos gerados pela mineração.

Dessa forma, a construção civil apresenta-se como um dos campos mais promissores para a valorização desses materiais, justificando a elevada frequência de estudos publicados em periódicos especializados na área. Além disso, a presença de periódicos com elevado fator de impacto reforça a relevância científica e a atualidade das discussões relacionadas ao tema.

4.1.2. Origem das publicações

No que se refere à distribuição geográfica das publicações, observa-se que a China lidera o volume de estudos publicados, seguida pelo Brasil, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3: Número de publicações por países.



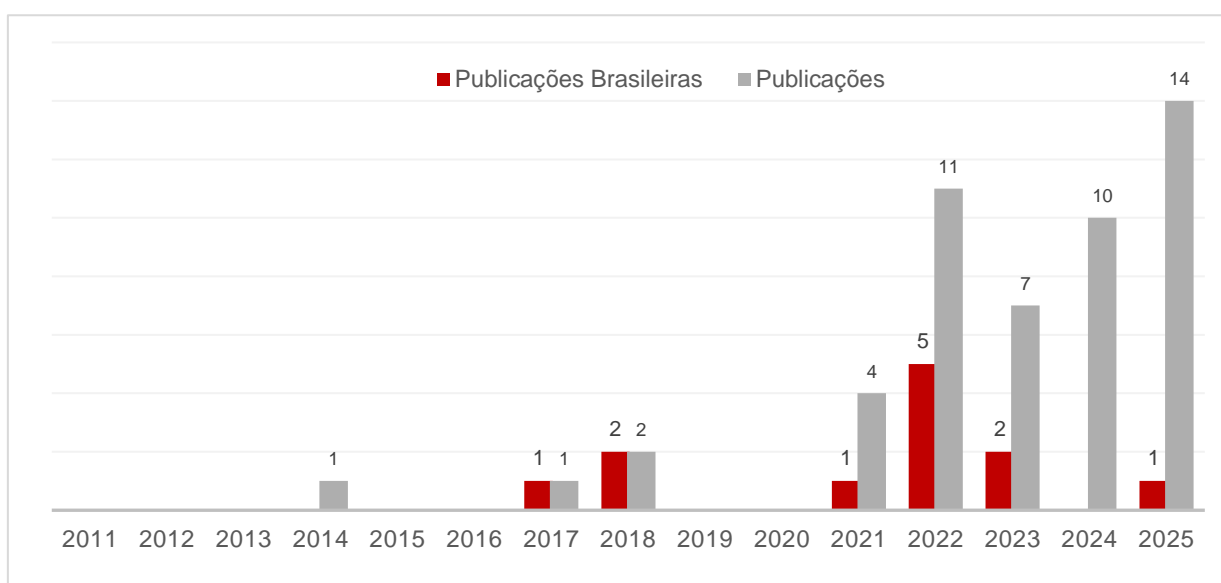
Fonte: Autora.

A liderança chinesa nas publicações pode ser explicada pelo fato de o país possuir forte investimento em pesquisa, além de ser o maior consumidor mundial e um dos principais produtores do minério de ferro (Oliveira *et al.*, 2025). O destaque do Brasil pode estar diretamente relacionado à sua posição como um dos principais produtores globais de minério de ferro (Almada *et al.*, 2022). Outro aspecto importante é que a ocorrência de eventos críticos envolvendo barragens de rejeitos também pode ser um grande fator que impulsionou o avanço das pesquisas voltadas ao reaproveitamento desses materiais.

Em contrapartida, a baixa representatividade da Austrália na produção científica selecionada nesta revisão chama a atenção, considerando sua posição de destaque na produção mundial de minério de ferro (Australia, 2025). Esse resultado sugere que fatores além do volume de produção mineral podem influenciar a intensidade das pesquisas sobre o reaproveitamento de resíduos, indicando uma oportunidade para investigações futuras sobre a distribuição geográfica desse campo de estudo.

A análise temporal das publicações, ilustrada na Figura 4, revela que, embora o filtro de pesquisa tenha considerado publicações a partir de 2011, os estudos sobre o tema começaram a ganhar expressividade apenas a partir de 2021, atingindo seu pico em 2025.

Figura 4: Número de publicações nos últimos 15 anos.



Fonte: Autora.

O crescimento no número de publicações a partir de 2017 pode ser interpretado como reflexo direto do aumento da atenção acadêmica após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (2015). Esse desastre marcou um ponto importante no debate sobre a gestão de resíduos de mineração no Brasil, o que se evidencia pelo fato de que as publicações dos anos seguintes mencionam esse episódio (Filho *et al.*, 2017; Freitas *et al.*, 2018; Galvão *et al.*, 2018). Mais tarde, o rompimento da barragem da mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019) intensificou ainda mais a urgência por soluções técnicas para redução de riscos associados à disposição de rejeitos. Como consequência, observou-se um volume ainda maior de estudos nos anos seguintes. Além de retomarem o caso de Mariana, todas as publicações brasileiras posteriores a 2019, com exceção de Cezar *et al.* (2025), também citam Brumadinho como referência central (Almada *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2023; Eugênio *et al.*, 2021; Eugenio *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2022; Mymrin *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2022; Saldanha *et al.*, 2023). Desse modo, nota-se uma relação direta entre esses eventos de grande impacto e o crescimento da produção científica nacional voltada ao reaproveitamento de resíduos de minério de ferro.

Nesse contexto, o papel desempenhado pelas instituições públicas de ensino, demonstra seu protagonismo na produção científica. Todos os artigos brasileiros identificados foram desenvolvidos por projetos vinculados a universidades federais. Destaca-se que pesquisadores da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) participaram de 7 dos 12 trabalhos. Isso evidencia a relevância do tema para o estado de Minas Gerais, especialmente na região do Quadrilátero Ferrífero, uma das principais províncias minerais do país e área onde se localizam as instituições citadas (Amaral, 2024).

4.1.3. Palavras chaves

A avaliação de coocorrência das palavras-chave dos trabalhos selecionados permite evidenciar os principais temas que estruturam a produção científica sobre o reaproveitamento de resíduos da mineração de ferro. Identificando quais assuntos aparecem de forma mais frequente e observando como essas palavras se relacionam entre si, indicando conexões temáticas entre os estudos analisados. A Figura 5 apresenta a rede de coocorrência das palavras-chave identificadas nos artigos selecionados para a revisão de literatura. Nessa representação, o tamanho dos nós é

Outro grupo de palavras-chave está associado à sustentabilidade, com termos como *environmental impact*, *life cycle* e *sustainable development*. Essa associação demonstra que a literatura analisada não trata o reaproveitamento dos resíduos da mineração de ferro apenas como uma alternativa técnica, mas também como uma estratégia ambientalmente relevante. Já a presença de termos como *fly ash*, *slag*, *coal* e *industrial solid wastes* indica a recorrência de estudos que associam os resíduos de minério de ferro a outros resíduos industriais. De forma geral, a análise das palavras-chave mostra que a produção científica selecionada se organiza em torno de quatro temas principais: reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro, desempenho mecânico, matrizes cimentícias e cerâmicas, e avaliação ambiental das aplicações.

A análise bibliométrica permitiu identificar tendências gerais da produção científica sobre o reaproveitamento de resíduos da mineração de ferro, evidenciando os principais periódicos, países, instituições e temas abordados pela literatura. Entretanto, a compreensão do potencial de aproveitamento desses materiais exige uma análise mais aprofundada dos estudos selecionados. Dessa forma, a partir da leitura criteriosa dos artigos, passou-se à avaliação qualitativa dos resíduos investigados, suas características e as aplicações propostas pelos autores. Os resultados dessa avaliação serão apresentados nos capítulos seguintes.

4.2. HETEROGENEIDADE DOS MATERIAIS

A análise dos artigos selecionados demonstrou que os resíduos da mineração de ferro apresentam elevada variabilidade em suas características físicas, químicas e mineralógicas. Nos trabalhos analisados, os resíduos são compostos predominantemente por sílica (SiO_2) e óxidos de ferro, porém suas proporções variam significativamente em função da origem do minério, da rota de beneficiamento empregada e das condições geológicas do depósito.

Rejeitos provenientes de diferentes regiões apresentam composições distintas. Na China, Zou *et al.* (2024) descreveram rejeitos com concentração de óxidos de cálcio (CaO), assim como em Jiang *et al.* (2022), que além do CaO foi apresentado uma concentração de magnésio (MgO), resultado da presença de minerais como a dolomita. Por outro lado, Wang *et al.* (2024b) identificaram rejeitos com alto teor de alumina (Al_2O_3). Já Huang *et al.* (2023) descrevem materiais com presença

significativa de enxofre (S). Fora do contexto chinês, Beulah *et al.* (2025), apresentaram um rejeito proveniente da Índia com baixíssimos teores de SiO_2 (inferiores a 10%) e predominância de hematita. Enquanto Khamseh *et al.* (2025) descrevem rejeitos iranianos com presença de fósforo (P), associados à depósitos de óxido de ferro-apatita.

No Brasil, os RMFs são predominantemente compostos por SiO_2 e óxidos de ferro (Fe_2O_3), apresentando uma heterogeneidade onde os teores de Fe_2O_3 podem variar em uma mesma planta (Almada *et al.*, 2022). Entretanto, uma lacuna identificada na literatura revisada é a concentração dos estudos que se voltam exclusivamente para Minas Gerais. Essa predominância ignora a diversidade de outras províncias produtoras de relevância. Embora o estado do Pará apareça em Sá *et al.* (2022) como fonte de outro material para mistura, o rejeito utilizado nesse caso permanece sendo de origem mineira. Isso indica uma carência de pesquisas em escala nacional que contemplem diferentes contextos geológicos e operacionais.

Outro fator determinante para a variabilidade dos rejeitos é a rota de beneficiamento mineral. Saldanha *et al.* (2023) explicam que o quartzo presente nesses materiais é resultante do processo de flotação utilizado na separação do concentrado de ferro, o que contribui para o aumento do teor de sílica nos rejeitos. Assim, materiais provenientes de beneficiamentos mais complexos tendem a apresentar maior conteúdo silicoso. Essa característica aproxima sua composição da areia natural, como apontam Liu *et al.* (2022), ao afirmarem que determinados rejeitos possuem composição química semelhante à da areia de rio. Além disso, Meng *et al.* (2025) afirmam que “mesmo que os materiais brutos contendo ferro sejam os mesmos, as características dos rejeitos de minério de ferro produzidos por diferentes técnicas serão diferentes”.

Essa diversidade de composições não apenas evidencia a complexidade desses materiais, mas também condiciona o desempenho dos materiais de reaproveitamento. Conforme destacado por Chen *et al.* (2025), a resistência à compressão de produtos cerâmicos produzidos com rejeitos pode variar significativamente em função da composição mineralógica. A presença de minerais como a biotita pode reduzir a resistência mecânica devido à sua estrutura lamelar e capacidade de retenção de água, que atrapalha o processo de sinterização. Já no

campo dos concretos, Zhao *et al.*, (2025b) demonstram que minerais como ferro-hornblenda e albita são mais sensíveis às ondas eletromagnéticas. Além disso, o estudo de Almada *et al.* (2022) evidencia que materiais com maior presença de ferro resultam em elevada massa específica.

A heterogeneidade evidencia que o desempenho dos materiais não pode ser previsto apenas com base em classificações genéricas, exigindo análises específicas para cada tipo de resíduo. Dessa forma a caracterização dos resíduos de minério de ferro deve ser compreendida como um fator importante para sua viabilidade de aplicação. A ausência de padronização pode dificultar a replicabilidade dos estudos, mas por outro lado, essa mesma variabilidade amplia o potencial de uso desses materiais, desde que suas propriedades sejam devidamente determinadas e direcionadas às aplicações propostas.

4.3. RESÍDUOS APROVEITADOS

A análise dos artigos selecionados permitiu que os resíduos utilizados fossem organizados em categorias. Considerando a diversidade de materiais observada, a classificação dos estudos foi feita conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Resíduos utilizados nos trabalhos

Tipo de resíduo	Nº de Artigos
Estéril	3
Lama / Rejeito ultrafino	17
Rejeito arenoso	34

4.3.1. Estéril

A revisão identificou uma baixa inserção do estéril nas pesquisas científicas, apesar do volume expressivo de material gerado durante a extração. Entre os 50 trabalhos analisados, apenas três abordam o seu reaproveitamento, o que evidencia uma lacuna importante na literatura.

Os estudos identificados exploram diferentes possibilidades de aplicação. Cezar *et al.* (2025) investigam o uso da fração fina do estéril como *filler* mineral. Um aspecto relevante observado pelos autores é que, embora o estéril utilizado apresente granulometria ligeiramente superior à do cimento, ele possui maior área superficial

específica, devido à sua morfologia. As partículas apresentam formato lamelar, com geometrias irregulares, alongadas e de baixa esfericidade. Essas características favorecem um comportamento semelhante ao de microfibras. Contribuindo para o aumento da resistência mecânica, através de um efeito de engrenagem entre as partículas, além de ampliar as superfícies disponíveis para ancoragem dos produtos de hidratação do cimento.

Já o objetivo de Saldanha *et al.* (2023) é a produção de um ligante de ativação alcalina, composto por mais de um resíduo da mineração. Os autores utilizam o estéril de natureza argilosa como base para a produção de um metacaulim alternativo. Nesse estudo, o estéril passa por um processo de calcinação à 800 °C para fazer com que o material adquira as características e reatividade necessárias para atuar como precursor aluminossilicato nas reações de ativação alcalina. Por sua vez, Zhang *et al.* (2023) avaliam o uso do estéril bruto como substituto integral de agregados naturais na produção de concretos. De modo geral, esses estudos apontam resultados promissores, incluindo melhorias em propriedades além da redução de impactos ambientais.

Do ponto de vista das propriedades do material, um aspecto comum observado nos estudos analisados é o caráter quimicamente inerte do estéril em seu estado natural, o que o diferencia dos rejeitos de beneficiamento. Essa característica pode limitar sua aplicação em materiais que dependem de reatividade química, precisando passar necessariamente por processos de ativação. Por outro lado, favorece usos que exigem estabilidade física e química, como agregados em concretos, materiais de pavimentação e preenchimento.

O estudo de Cezar *et al.* (2025) também indica que o estéril permanece subutilizado, principalmente em função do alto custo de transporte e de sua recorrente classificação como um material de baixo valor econômico. Esse cenário evidencia a necessidade de ampliar as pesquisas voltadas ao seu reaproveitamento, de modo a reavaliar seu papel na cadeia produtiva e promover sua valorização técnica. A partir desse avanço, o estéril pode deixar de ser visto apenas como um passivo da mineração e passar a ser reconhecido como um recurso potencial. Nesse contexto, a valorização pode contribuir para a mudança de percepção negativa sobre a utilização desse material. Podendo tornar até mesmo o custo de transporte menos limitante à

medida que o estéril passa a ser considerado uma possível matéria-prima para diferentes aplicações.

4.3.2. Lama / Rejeito ultrafino

As lamas e rejeitos ultrafinos foram identificados em 17 dos 50 artigos analisados, configurando o segundo grupo de resíduos mais recorrente nesta revisão. Os estudos concentram-se principalmente em aplicações em matrizes cimentícias, materiais cerâmicos, pavimentação e remediação ambiental.

Os trabalhos analisados indicam que fisicamente, os rejeitos classificados como lamas ou ultrafinos são marcados por uma elevada área superficial específica e extrema finura, morfologia tipicamente irregular e angular, composta muitas vezes por partículas lamelares (Almada *et al.*, 2022; Khamseh *et al.*, 2025; Meng *et al.*, 2025; Wei *et al.*, 2022). Essas propriedades são fundamentais para ditar seu comportamento em diversas aplicações, permitindo que o material atue tanto como um bom *filler* quanto como um agente quimicamente ativo. Eugenio *et al.* (2024) e Filho *et al.* (2017) demonstram que a finura do rejeito contribui para o melhor empacotamento de partículas, uma vez que os materiais mais finos tendem a preencher os vazios. De maneira complementar, Almada *et al.* (2022), Liang *et al.* (2022) e Meng *et al.* (2025) ressaltam que a elevada área superficial específica desses materiais permite a aderência aos produtos de hidratação do cimento em matrizes cimentícias. Além disso, a morfologia lamelar também garante o travamento mecânico de matrizes, como abordado no trabalho de Khamseh, *et al.* (2025). Em conjunto, essas características resultam em produtos com maior densidade e resistência mecânica.

No âmbito das características químicas, a reatividade do rejeito ultrafino pode ser ampliada por métodos que permitem sua atuação como material ativo. Beulah *et al.* (2025), Wang *et al.* (2025) e Zhong *et al.* (2024) utilizam a ativação alcalina para promover a dissolução de aluminossilicatos (provenientes do próprio rejeito ou de outros precursores). Nesse processo, a adição de ativadores alcalinos, como o hidróxido de sódio (NaOH), favorece a ruptura das ligações químicas estáveis das estruturas cristalinas, liberando espécies reativas de silício e alumínio. Essas espécies, por sua vez, participam de reações que formam redes de géis de hidratação, como o C-(N)-A-S-H (aluminossilicato de cálcio (e sódio) hidratado), que asseguram

a integridade estrutural do componente (Ferreira *et al.*, 2022). Dessa forma, a ativação permite transformar um material originalmente inerte em um insumo com propriedades cimentícias. Já Li *et al.* (2024) abordam a utilização como um *filler* ativo, onde o rejeito não precisou por passar por processos de ativação, devido sua característica ultrafina já apresentar propriedades cimentícias.

Liang *et al.* (2022) e Meng *et al.* (2025) demonstram que a ativação mecânica por meio da moagem dos rejeitos também resulta na quebra de ligações cristalinas, aumentando sua área superficial e possibilitando comportamento pozolânico. No entanto, Liang *et al.* (2022) afirmam que a efetividade da reatividade depende diretamente das condições químicas da matriz, especialmente do pH do sistema. No estudo de Meng *et al.* (2025), observa-se que o rejeito utilizado, denominado HMPT-IOT (RMF transformado por fase mineral de hidrogênio), já apresenta nanopartículas de quartzo ativo em sua superfície. Diferentemente do quartzo convencional, elas possuem capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) liberado durante a hidratação do cimento, promovendo a produção de C-S-H. Essa interação contribui para a formação de produtos cimentícios secundários, ampliando o potencial de uso do material em sistemas à base de cimento.

Além das aplicações em matrizes cimentícias, a versatilidade do rejeito ultrafino permite seu aproveitamento no desenvolvimento de produtos cerâmicos. Os trabalhos de Chen *et al.* (2025), Huang *et al.* (2025a), Li *et al.* (2025) e Li *et al.* (2021) detalham como o rejeito atua sob altas temperaturas durante a queima. Enquanto a desidratação e a desidroxilação de minerais de estrutura lamelar induzem a formação de microfissuras, a fusão de fases ricas em sílica e alumina, inicia-se em temperaturas superiores a aproximadamente 810 °C, gerando uma fase líquida de baixa viscosidade. Essa fase líquida promove a reconstrução da matriz, resultando na formação de componentes estáveis, como diopsídio, espinélio e microclina. A aplicação do rejeito também alcança áreas não estruturais, como na produção de tintas sustentáveis onde o resíduo atua como pigmento inorgânico (Galvão *et al.*, 2018), como sub-base de pavimento (Khamseh *et al.*, 2025) e na remediação ambiental, por meio da produção de condicionadores de solo que utilizam o ferro presente no rejeito para auxiliar na recuperação de áreas degradadas (Hou *et al.*, 2024).

Apesar do potencial de reaproveitamento, a literatura destaca que a produção das lamaz em larga escala ainda exige melhorias no seu manejo. Tecnologias como filtragem e empilhamento a seco tornam o material mais estável e seguro (Ferreira *et al.*, 2022; Saldanha *et al.*, 2023). Além disso, essas soluções contribuem para a valorização do resíduo ao disponibilizar um material em condição mais favorável de uso. Nesse contexto, observa-se uma diferença em relação aos rejeitos arenosos que serão abordados no próximo capítulo. Enquanto resíduos de granulometria maior frequentemente necessitam de etapas adicionais de processamento antes de serem utilizados, as lamaz, por já apresentarem partículas ultrafinas, podem reduzir ou até eliminar essa necessidade. Representando uma vantagem operacional e energética.

4.3.3. Rejeito arenoso

O rejeito arenoso foi o material mais recorrente entre os estudos analisados. Entretanto, dos 35 trabalhos identificados, observou-se que parte deles realiza processamentos adicionais, como moagem ou britagem, com o objetivo de reduzir a granulometria para faixas ultrafinas ($<75 \mu\text{m}$). Enquanto Almada *et al.* (2022) abordam a utilização de um simples processo de redução granulométrica para a adequação de uso como *filler*, vários estudos demonstram que esses passos são fundamentais também para a ativação da reatividade do material. Nesse contexto, Almada *et al.* (2022) destacam a necessidade de novos estudos que processem menos os resíduos, visto que a implementação desses tratamentos requer grande quantidade de energia e custos, reduzindo o caráter sustentável das pesquisas.

De modo geral, os materiais passam por ciclos de moagem em tempos determinados. O objetivo é modificar a superfície e a estrutura mineralógica do rejeito, conferindo ao material comportamento reativo, favorecendo a resistências dos produtos gerados apenas através da ativação mecânica. Os trabalhos de Tian *et al.* (2024), Wang *et al.* (2023), Wang *et al.* (2024a) e Zhang *et al.* (2023) utilizam a ativação mecânica para produzir materiais pozolânicos capazes de atuar apenas com a alcalinidade natural gerada pela hidratação do cimento. Nesses casos o rejeito reage com a portlandita gerada na hidratação do cimento, aproveitando da alcalinidade natural do sistema para formar gel C-S-H adicional, se comportando como material cimentício suplementar (MCSs). Carvalho *et al.* (2023), Huang *et al.* (2025b) e Zhang *et al.* (2022), por outro lado, utilizam da ativação mecânica em combinação com a

ativação química. Huang *et al.* (2025b) e Zhang *et al.* (2022) utilizam a ativação alcalina explicada no capítulo anterior, enquanto Carvalho *et al.* (2023) utilizam o mecanismo de ativação ácida com ácido fosfórico (H_3PO_4). A ativação ácida tem comportamento semelhante, à alcalina no sentido de promover a dissolução de íons, para gerar uma nova fase cristalina estável.

A ativação também pode ocorrer em altas temperaturas. Saldanha *et al.* (2023), exploram a ativação térmica controlada para produzir silicato de sódio a partir do quartzo presente no rejeito, viabilizando sua aplicação como precursor químico para a produção de um novo ligante. Já nos trabalhos de Chen *et al.* (2025), Guo *et al.* (2023), Ma *et al.* (2025b, 2025a), Wang *et al.* (2024b) e Zou *et al.* (2024), os rejeitos arenosos são ativados por meio de processos de sinterização ou queima. O objetivo principal é promover a reconstrução mineralógica das fases cristalinas originais em novos componentes estáveis. Visando a densificação da matriz ou a criação de estruturas de porosidade controlada para aplicações na produção de argilas expandidas (ceramsites), ou de um compósito cristalino denso, no caso de Zou *et al.* (2024), que pode apresentar diferentes aplicações.

Apesar de que Guo *et al.* (2024) e H.K; Hossiney (2022) ativam alcalinamente o rejeito, sem a necessidade de processamento mecânico, em geral, sem processos de ativação, o rejeito arenoso mantém comportamento predominantemente inerte. Dessa forma, ele atua como *filler* ou agregado, dentro de uma matriz ligante formada pela ativação de outros precursores mais ativos (como escória e cinzas). Nos estudos em que o material é utilizado sem modificação granulométrica significativa, sua principal aplicação ocorre como substituto de agregados. Essa substituição é tecnicamente viável devido à similaridade de composição e estabilidade de qualidade entre o rejeito arenoso e a areia natural (Eugênio *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2022; Freitas *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023; Lv *et al.*, 2021; Sá *et al.*, 2022; Rao; Chandar, 2021; Xin *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2025a; Zhao; Fan; Sun, 2014). Embora compartilhem o uso como agregado, as pesquisas abordam objetivos distintos. Huang *et al.* (2023), por exemplo, avalia que a viabilidade técnica como agregado pode ser influenciada por componentes químicos. Já Sá *et al.* (2022) avaliam misturas de solo-cimento. Rao; Chandar (2021), por sua vez, utilizam o material para conferir eficiência térmica em tijolos. Enquanto a maioria

das pesquisas foca na fração miúda, o trabalho de Zhao *et al.* (2025b) explora a viabilidade do uso desses rejeitos como substituto do agregado graúdo.

De forma geral, o rejeito arenoso destaca-se como um resíduo promissor para aplicações em larga escala, principalmente em função de sua elevada disponibilidade e de sua compatibilidade com materiais granulares naturais. Seu desempenho, contudo, está diretamente relacionado à granulometria, à composição mineralógica e à forma de utilização adotada. Em aplicações que exigem maior reatividade, podem ser necessárias etapas adicionais de processamento, como moagem ou tratamento térmico. A necessidade desses tratamentos não inviabiliza nem descarta o reaproveitamento do material, mas reforça a importância de avaliar os custos energéticos, econômicos e ambientais associados a cada novo processamento. Paralelamente, diversos estudos demonstram que o aproveitamento do caráter predominantemente inerte do rejeito arenoso também apresenta resultados promissores. Dessa forma, a viabilidade de uso desse resíduo depende da compatibilização entre suas características naturais, as necessidades de tratamento do resíduo e dos benefícios técnicos obtidos em cada aplicação.

4.4. POSSIBILIDADES DE APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO

A análise dos estudos selecionados evidenciou uma ampla diversidade de aplicações para os resíduos da mineração de ferro. Os trabalhos revisados demonstram que esses materiais podem desempenhar diferentes funções técnicas. Dessa forma, os principais grupos de aplicação identificados na literatura são apresentados Tabela 3.

Tabela 3: Grupos de aplicações dos resíduos nos trabalhos.

Grupos de aplicação dos resíduos	Nº de Artigos
Compósitos cimentícios	26
Compósitos cerâmicos	13
Infraestrutura / Asfalto	5
Geopolímeros	3
Estabilização / Geotecnia	1
Pigmento	1

Grupos de aplicação dos resíduos	Nº de Artigos
Agricultura	1

A organização mostra que a maior parte das pesquisas está concentrada na construção civil, sendo que quase 80% dos trabalhos abordam o desenvolvimento de materiais à base de cimento e produtos cerâmicos. Esse comportamento evidencia a capacidade desse setor de absorver grandes volumes de resíduos minerais. Já as demais aplicações aparecem em menor número, mas demonstram a versatilidade desses materiais.

4.4.1. Compósitos cimentícios

A Tabela 4 apresenta os estudos que investigaram o uso de resíduos da mineração de ferro em compósitos cimentícios. Os trabalhos analisados concentram-se principalmente na substituição parcial de agregados naturais e na utilização dos resíduos como *filler*, avaliando seus efeitos sobre propriedades mecânicas e de durabilidade.

Tabela 4: Trabalhos com aproveitamento físico de resíduos da mineração de ferro em compósitos cimentícios.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Zhao <i>et al.</i> , 2025a)	Concreto	Agregado miúdo	Avaliação da durabilidade sob corrosão, simulando o a utilização de água salobra para o preparo do concreto <i>in loco</i> .	Substituição de 25% aumentou a resistência. Substituição de 50% resultou em perda de desempenho.
(Rao; Chandar, 2021)	Tijolo sem queima, estabilizado com cimento	Agregado miúdo	Uso combinado com perlita expandida para compensar o peso elevado do RMF.	Substituição ideal de 50%. Desempenho térmico positivo. As paredes mantiveram a temperatura interna inferior à dos tijolos comuns.
(Zhang <i>et al.</i> , 2024)	Compósito cimentício de engenharia (ECC)	Agregado miúdo (substituição integral)	O estudo aprofunda a avaliação do comportamento de retração, diferente de estudos que focam na resistência.	O uso do agregado reduziu a retração autógena e a retração por secagem, o que reduz o risco de fissuração por contração em estruturas reais.
(Liu <i>et al.</i> , 2022)	Concreto	Agregado miúdo	Foco na durabilidade do concreto sob o ataque de sulfatos.	Substituição de 40% apresentou a menor porosidade total e a microestrutura mais densa. Teores >40% resultaram na aceleração da deterioração da matriz.
(Lv <i>et al.</i> , 2021)	Concreto para barragens	Agregado miúdo e agregado graúdo (integral)	Concreto projetado para suportar as condições severas de estruturas hidráulicas.	Durabilidade superior ao concreto convencional. Resistência à abrasão significativamente maior. Microestrutura mais densa na região de contato entre o agregado e a pasta de cimento.
(Liu <i>et al.</i> , 2023)	Argamassa	Agregado miúdo	O trabalho avalia a resistência à carbonatação e aos ciclos de gelo-degelo.	Substituição ideal de 25% para garantir propriedades mecânicas superiores. Com 100% de substituição, a redução na resistência mecânica foi inferior a 10%, o que ainda é considerado aceitável para aplicações.
(Eugênio <i>et al.</i> , 2021)	Telhas de concreto extrudadas	<i>Filler</i>	O RMF atua como substituto do pó calcário (<i>limestone powder</i>). O trabalho faz uma análise do comportamento do material em um processo industrial de extrusão	Resistência à quebra aumentou conforme o teor de rejeito, sendo que a substituição de 100% resultou em telhas 13% mais resistentes que as convencionais. Entretanto houve um aumento significativo na condutividade térmica.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Zhao <i>et al.</i> , 2025b)	Concreto	Agregado graúdo	O estudo avalia como o rejeito pode ser usado para induzir estresse térmico e facilitar a fragmentação (demolição) assistida por micro-ondas.	A resistência à compressão reduziu em 31,18%. Uso das propriedades de absorção de micro-ondas facilitou a fragmentação controlada.
(Filho <i>et al.</i> , 2017)	<i>Pavers</i> intertravados	Agregado miúdo	O estudo produziu blocos de pavimentação para aplicações em infraestrutura viária.	Todas as misturas (até 80% de substituição) atingiram resistência à compressão superior a 35 MPa, atendendo aos requisitos para tráfego comercial pesado.
(Zhao; Fan; Sun, 2014)	Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC)	Agregado miúdo	O estudo avalia o impacto da substituição nas propriedades do material em dois regimes de cura (padrão e cura a vapor).	Em substituições <40% o desempenho mecânico foi considerado comparável ao controle. No caso da cura a vapor, as resistências à compressão diminuíram, enquanto a resistência à flexão aumentou em relação ao concreto convencional.
(Almada <i>et al.</i> , 2022)	Argamassa	<i>Filler</i>	O trabalho analisa o impacto de diferentes graus de processamento mineral nas características dos rejeitos.	Aumento na resistência à compressão e o módulo de elasticidade na maioria das amostras. Redução na porosidade total e matriz densa. A adição de RMF reduziu a trabalhabilidade de todas as misturas.
(Cezar <i>et a.</i> , 2025)	SHCC (<i>Strain-Hardening Cement-Based Composites</i>)	<i>Filler</i>	Foco no uso do estéril, diferenciando-se dos rejeitos de beneficiamento, que são mais comumente estudados. Avalia compósitos cimentícios de alto desempenho, reforçados com microfibras poliméricas.	Redução na resistência à compressão e na densidade. Aumento significativo na capacidade de deformação.

De modo geral, os estudos apresentados na Tabela 4 indicam que o desempenho dos compósitos depende principalmente do teor de substituição adotado. Em substituições parciais de agregados, frequentemente situadas em faixas de 20% a 40%, o RMF pode contribuir para o aumento da resistência mecânica, para a redução da porosidade e para a formação de uma matriz mais densa. Esse comportamento está associado ao melhor preenchimento dos vazios e, em alguns casos, à formação de uma Zona de Transição Interfacial mais compacta entre o agregado e a pasta cimentícia. No entanto, quando utilizado em teores muito elevados, o resíduo pode comprometer o desempenho do material, principalmente devido à redução da trabalhabilidade e ao empacotamento menos eficiente das partículas. Dessa forma, o uso do RMF como agregado ou *filler* não deve ser compreendido apenas como uma substituição direta da matéria-prima natural, mas como uma incorporação que exige ajuste de dosagem e avaliação das propriedades do resíduo utilizado.

Além das propriedades mecânicas, alguns trabalhos ampliam a análise para aspectos específicos de desempenho. Entre eles, destacam-se estudos voltados à durabilidade frente ao ataque por sulfatos e cloretos, à resistência à abrasão, ao comportamento térmico, à retração e à fragmentação assistida por micro-ondas. Esses enfoques demonstram que a viabilidade dos compósitos cimentícios com RMF não se limita à resistência à compressão, mas também apresenta capacidade de atender a exigências específicas de uso. Além disso, aplicações em infraestrutura viária, concreto para barragens, telhas de concreto, tijolos estabilizados e compósitos de alto desempenho mostram que o aproveitamento do resíduo pode ser direcionado a produtos com diferentes requisitos técnicos, evidenciando sua versatilidade e seu potencial de inserção com diferentes objetivos. Em alguns casos, os estudos ainda demonstram a possibilidade de uso em processos industriais reais, como extrusão de telhas ou produção em escala piloto dos tijolos, aproximando a pesquisa laboratorial de condições práticas de aplicação.

No contexto de versatilidade, alguns trabalhos não foram inseridos na Tabela 4 justamente por apresentarem uma atuação mais híbrida do resíduo. Em Huang *et al.* (2025b), por exemplo, o rejeito é empregado como areia em concretos de ultra-alto desempenho, mas também apresenta contribuição reativa em sistemas ativados

alcalinamente. Wang *et al.* (2022) modificam quimicamente o rejeito usado como agregado para conferir propriedades hidrofóbicas à argamassa através de modificações químicas com ácido esteárico. Huang *et al.* (2023) utilizam RMFs com alto teor de enxofre em argamassas cimentícias, nos quais as partículas atuam como agregado e também como materiais auxiliares nos processos de hidratação. De forma semelhante, Zhang *et al.* (2023) exploram o uso simultâneo do rejeito como material cimentício suplementar, agregado miúdo e agregado graúdo, demonstrando uma aplicação mais complexa e multifuncional.

Essa transição entre função física e função reativa evidencia que os resíduos de minério de ferro podem desempenhar diferentes papéis dentro dos compósitos cimentícios. Por esse motivo, além dos estudos em que o RMF atua predominantemente inerte, torna-se necessário analisar os trabalhos que exploram de forma mais direta sua reatividade. A Tabela 5 reúne esses estudos, nos quais o resíduo é aplicado com o propósito de ser um componente capaz de participar das reações de hidratação, ativação ou formação de novas fases cimentícias.

Tabela 5: Trabalhos que exploram o potencial reativo do RMF em matrizes cimentícias.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Li <i>et al.</i> , 2024)	Concreto celular	Substituição parcial do cimento	O RMF já apresenta graduação semelhante à do cimento, sendo ativado através da alcalinidade natural da matriz	O foco do trabalho é investigar as propriedades do concreto sob cargas de alta taxa de deformação, sob impactos de alta velocidade.	Substituição ideal entre 25% e 30%. Boa capacidade de absorção de energia Resistência à compressão diminui com o aumento do teor de RMF, mas a taxa de deformação aumenta. A inclusão de RMF reduz a quantidade de gel C-S-H.
(Wang <i>et al.</i> , 2024a)	Argamassa	Material cimentício suplementar (MCS), em substituição ao cimento e <i>filler</i>	Ativação mecânica através de moagem transformando-o em um pó micronizado com um tamanho de partícula médias de 2,61 μm	Produz um sistema ternário de MCS e investiga o "efeito de superposição" e a cooperação entre esses três resíduos sólidos utilizados	Mesmo com 40% de substituição do cimento pelo sistema ternário, os requisitos normativos de resistência foram atendidos. A adição de RMF aumentou levemente a retração em relação ao sistema binário (indicando maior grau de hidratação). A incorporação do RMF melhorou a densidade da matriz e da zona de transição interfacial.
(Wang <i>et al.</i> , 2023)	Argamassa	Material cimentício suplementar (MCS) e <i>filler</i>	Moagem úmida por 60 minutos. Partículas reduzidas para 2,95 μm . O material participa de reações com a portlandita gerada pelo cimento e com as fases de sílica-alumina da escória de aço.	O trabalho analise o comportamento conjunto entre o RMF e a escória de aciaria.	A mistura otimizada (com 20% de escória e 10% de rejeito) atingiu 50,32 MPa aos 28 dias, o que representa 93% da resistência da amostra de cimento puro e um aumento de 16,16% em relação ao sistema cimento-escória sem o rejeito.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Meng <i>et al.</i> , 2025)	Argamassa	Material cimentício suplementar (MCS), em substituição ao cimento	A reatividade é inerente ao tipo de rejeito utilizado (HMPT-IOT). Dessa forma, não precisou de passar por processos de ativação antes de ser incorporado à mistura.	Foco no potencial de utilização de rejeitos de minério de ferro derivados do processo de transformação de fase mineral por hidrogênio (HMPT-IOT) gerados em processamento que utiliza hidrogênio para recuperar ferro de minérios mais complexos.	O rejeito promoveu a extensão da hidratação e a redução de vazios na matriz. Foi recomendado um nível máximo de substituição de 30% para manter o desempenho compatível com os padrões de cimento Portland.
(Tian <i>et al.</i> , 2024)	Argamassa	Material cimentício suplementar (MCS), em substituição ao cimento	Produção de um pó de VTiot (rejeitos de minério de ferro vanádio-titânio) ativado. Através da moagem em moinho de bolas por diferentes intervalos de tempo.	Foco em um tipo específico de rejeito (vanádio-titânio), que geralmente apresenta teores de sílica menores ao comum, sendo pouco explorado como material cimentício.	Com 30% de rejeito moído por 50 minutos atingiu resistências à compressão de 29 MPa aos 7 dias e 38,7 MPa aos 28 dias. A moagem aumentou a liberação de íons Si^{4+} e Al^{3+} , promovendo a formação de produtos de hidratação como etringita (AFt), gel C-S-H.
(Mymrin <i>et al.</i> , 2022)	Concreto sem cimento	Formação de géis de hidratação	Reatividade do rejeito é "despertada" pelo ambiente altamente alcalino criado.	O trabalho desenvolve novos compósitos para a construção civil, baseados exclusivamente no reaproveitamento de resíduos industriais.	Resistência à compressão de 11,47 MPa após 720 dias. Resistente à água. Atende aos requisitos das normas brasileiras para tijolos, blocos e bases de pavimentação.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Guo <i>et al.</i> , 2024)	Argamassa projetada para ser utilizada como material de grauteamento	Material cimentício suplementar (MCS), em substituição ao cimento e <i>filler</i>	Ativação alcalina com hidróxido de sódio (NaOH) e Silicato de sódio (Na ₂ SiO ₃)	Avalia a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de minério de ferro com alto teor de enxofre (SIOT) em argamassas ativadas alcalinamente.	O aumento do teor de RMF prolongou o tempo de pega, e misturas com 25% e 50% de rejeito apresentaram as melhores fluidez, adequadas para grauteamento. A interação entre os sulfatos do rejeito e o cálcio da escória promoveu a formação inicial de gesso e etringita, o que contribuiu para o adensamento da microestrutura e ganho de resistência inicial
(Eugenio <i>et al.</i> , 2024)	Placas de fibrocimento extrudado	Material cimentício suplementar (MCS), em substituição ao cimento e <i>filler</i>	O RMF já apresenta graduação semelhante à do cimento, sendo ativado através da alcalinidade natural da matriz	Foco na interação entre o rejeito e as fibras vegetais. O trabalho investiga como a adição de RMF pode reduzir a degradação das fibras ao diminuir a alcalinidade da matriz de cimento,	Substituição ideal de 10%. Observou-se uma melhor preservação das fibras nos compósitos com maiores teores de RMF.
(Liang <i>et al.</i> , 2022)	Cimento de oxissulfato de magnésio (MOS) sustentável	Substituto parcial do pó de magnésia queimada (LBM) e <i>filler</i>	Moagem mecânica em moinho de bolas.	Uso combinado do RMF ativado e do aditivo HEDP para superar as deficiências características do cimento MOS, que tipicamente apresenta cura muito rápida e baixa resistência à água.	1h foi determinado como o tempo ideal de moagem. A inclusão de 10% de RMF ativado conseguiu manter a resistência à compressão do bloco de teste sem perdas. A combinação com o aditivo resultou em aumento da fluidez e dos tempos de pega inicial e final.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Zhang <i>et al.</i> , 2022)	Argamassa	Material cimentício suplementar (MCS), em substituição ao cimento e <i>filler</i>	Moagem mecânica em moinho de bolas combinada com a adição de ativadores químicos alcalinos.	Foca nos efeitos do tempo de moagem e do uso de diferentes ativadores químicos nas propriedades de um sistema de materiais cimentícios suplementares (MCSs) produzido com diferentes resíduos industriais.	2h foi determinado como o tempo máximo de moagem. O tratamento reduziu a cristalinidade do RMF de 100% para até 65%. O aumento do tempo de moagem mais os ativadores químicos melhoraram significativamente o índice de atividade do sistema.

De modo geral, nos estudos apresentados na Tabela 5, o RMF é utilizado como MCS, atuando como componente auxiliar na formação de produtos de hidratação. No entanto, essa atuação não deve ser compreendida como uma reatividade natural e comum a todo material, uma vez que, na maior parte dos casos, o rejeito precisa passar por processos de ativação mecânica, por moagem, ou química, ou ser inserido em matrizes com condições alcalinas favoráveis específicas. Após esses processos, o RMF pode apresentar maior potencial de participação nas reações da matriz cimentícia. Ainda assim, a análise dos resultados indica que o rejeito não se comporta como um ligante altamente ativo. Em muitos casos, sua contribuição como *filler*, por meio do preenchimento de vazios e da densificação das matrizes, mostra-se tão relevante quanto sua participação nos processos de hidratação. Isso é evidenciado no trabalho de Li *et al.* (2024) que identifica que apesar de auxiliar nos processos de hidratação, a inclusão de RMF reduz a quantidade de gel C-S-H na matriz.

Observa-se também que muitos trabalhos utilizam argamassas como compósito experimental para avaliar o potencial do RMF como SCM. Entretanto, é importante destacar que essa escolha não limita sua aplicação final a esse tipo de compósito. Em geral, os estudos que produzem argamassas indicam que o SCM desenvolvido também pode ser aplicado em outros materiais cimentícios, como concretos e elementos construtivos diversos. Dessa forma, a argamassa funciona principalmente como um modelo experimental padrão, permitindo avaliar com maior controle o comportamento do material, e não como a única possibilidade de uso.

Outro ponto importante é que a necessidade de processamento do RMF implica consumo de energia, o que deve ser considerado na avaliação da viabilidade técnica e ambiental da aplicação. Além disso, a ativação mecânica não deve ser realizada de forma indiscriminada. Zhang *et al.*, (2022), por exemplo, observaram que a área superficial específica do rejeito tendeu a diminuir após longos tempos de moagem devido à aglomeração das partículas causada por forças moleculares, indicando a importância do controle do tempo de ativação mecânica. Do mesmo modo, os resultados que apontam teores ótimos de substituição reforçam a necessidade de controle da dosagem, para que o aproveitamento do RMF contribua para o desempenho da matriz sem comprometer suas propriedades desejadas.

4.4.2. Compósitos cerâmicos

Outro grupo de aplicação que evidencia o potencial da construção civil em absorver resíduos da mineração de ferro é o dos compósitos cerâmicos. Nessa classificação, os trabalhos analisados demonstram que os RMFs podem ser utilizados como matéria-prima na produção de diferentes materiais. A análise conjunta dos estudos permitiu identificar três rotas principais de aproveitamento. A primeira está relacionada à produção de tijolos em sistemas de baixa temperatura ou sem queima, nos quais o desempenho é obtido principalmente por ativação química ou alcalina. A segunda envolve a produção de argilas expandidas (*ceramsite*), agregados cerâmicos leves e resistentes. A terceira rota corresponde à produção de cerâmicas porosas e funcionais, voltadas a aplicações específicas, como isolamento térmico e absorção sonora. Dessa forma, as tabelas seguintes organizam os trabalhos conforme o tipo de produto desenvolvido e a rota tecnológica adotada, permitindo compreender como os resíduos podem assumir diferentes funções dentro da matriz cerâmica.

Tabela 6: Trabalhos que estudam tijolos cerâmicos produzidos em sistemas de baixa temperatura ou sem queima

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(H.K.; Hossiney, 2022)	Tijolos	Substituto da argila tradicional; <i>Filler</i>	Produção de Tijolos de RMFs, cinzas volantes (FA) e escória de alto-forno granulada moída (GGBS), ativados alcalinamente, e produzidos por compactação em máquina manual e curados em condições ambientais. Uso de apenas silicato de sódio (Na_2SiO_3) como ativador alcalino.	Resistência à compressão máxima atingida foi de 18,45 Mpa (40% de substituição). Todas as misturas apresentaram absorção de água inferior a 20%, atendendo aos padrões de mercado. Não houve eflorescência nas misturas com <50% de RMF, mas teores mais elevados resultaram em depósitos de sais na superfície devido ao excesso de álcalis não reagidos.
(Beulah <i>et al.</i> , 2025)	Tijolos	Substituto da argila tradicional; <i>Filler</i>	Explora a viabilidade do uso combinado de RMFs e lama vermelha (RM) na fabricação de tijolos sustentáveis com GGBS e cal. Os tijolos são produzidos através de prensagem manual.	Os tijolos compostos por 70% de RMF e 30% de GGBS atingiram uma resistência à compressão de 6,25 MPa, sendo classificados como tijolos de Classe III. Os valores de absorção de água cumpriram os requisitos das normas técnicas
(Freitas <i>et al.</i> , 2018)	Tijolos	Agregado fino	Desenvolvimento de tijolos maciços, produzidos em prensa mecânica manual e submetidos à cura (sem queima. Uso combinado da escória de aciaria (BOF) e dos RMFs como matérias-primas secundárias.	Todas as composições testadas atenderam requisitos mínimos para tijolos cerâmicos. A adição de 15% de RMF teve um efeito negativo na resistência em comparação com o tijolo de 100% escória, indicando que o RMF não melhorou a atividade hidráulica da escória como previsto. Os tijolos produzidos foram mais pesados do que os tijolos maciços comuns.

Tabela 7: Trabalhos que estudam a produção de argilas expandidas (*ceramsites*)

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Guo et al., 2023)	Ceramsita Porosa	Matéria-prima principal.	Fornece SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e óxidos fundentes, fundamentais para a formação de componentes vítreos. O pré-aquecimento remove a água inicial. O processo de sinterização ocorre a 1177°C.	Explora a otimização e os mecanismos de formação de poros da co-utilização de RMFs e cinzas volantes de carvão (CFA) para a preparação de ceramista.	Condição ideal: 76% de RMF. O material atingiu uma porosidade de 56,98%, com densidade aparente de 1,37 g/cm ³ . Apresentou uma resistência à compressão de 8,75 MPa, considerada favorável para um material de alta porosidade.
(Wang et al., 2024b)	Ceramsita de alta resistência	Matéria-prima principal.	Fornece SiO ₂ e Al ₂ O ₃ fundamentais para a formação de componentes vítreos (esqueleto cerâmico) O pré-aquecimento remove a água inicial. O processo de sinterização para a mistura contendo RMF, cinzas volantes e bentonita ocorre a 1150°C. Para 100% de RMF a ativação ideal ocorre a 1200°C.	Foco em atingir resistências mecânicas excepcionalmente elevadas e absorção de água nula, através do uso combinado de RMF CFA e bentonita. Além disso, o trabalho introduz o uso de fluoreto de cálcio (CaF ₂) como um aditivo para reduzir o ponto de fusão e a temperatura de sinterização, visando a eficiência energética.	A ceramsita atingiu uma resistência à compressão média de 52,33 MPa, superando significativamente agregados cerâmicos comuns. Alcançou uma taxa de 0% de absorção de água, indicando uma estrutura interna extremamente compacta e impermeável. Apresentou uma densidade aparente de 2,6 g/cm ³ .
(Ma et al., 2025a)	Ceramsita de alta resistência	Matéria-prima principal.	Fornece SiO ₂ , Al ₂ O ₃ e óxidos fundentes. O pré-aquecimento remove a água inicial. O processo de sinterização ocorre a 1175°C.	Foco na otimização das propriedades físicas e mecânicas na obtenção de um produto de alto desempenho utilizando 100% de resíduos sólidos. RMF e ganga de carvão (CG)	Ceramsita otimizada: 45% RMF e 55% CG. Atingiu uma resistência à compressão de cilindro de 7,3 Mpa. Densidade aparente de 1,756 g/cm ³ . Baixa taxa de absorção de água de 8,83%. Porosidade de 35,83%, predominando a forma de microporos fechados que garantem a integridade mecânica.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Ma et al., 2025b)	Ceramsita de alta resistência	Matéria-prima principal.	Fornecer SiO_2 , Al_2O_3 e óxidos fundentes. O pré-aquecimento remove a água inicial. As pelotas são secas em estufa a 105°C por mais de 4 horas até atingirem peso constante. A ativação ideal ocorre a 1180°C por 25 minutos.	Foco na evolução das fases gasosas e no comportamento viscoso da fase líquida para a obtenção de um produto de alto desempenho utilizando 100% de resíduos sólidos. RMF e ganga de carvão (CG) Avalia o efeito sinérgico entre a CG e RMF.	A porosidade aumentou conforme o teor de RMF. Ceramsitas otimizadas para as proporções de CG:RMF de 55:45 e 45:55. A ceramsita composta apenas por RMF apresentou uma queda na resistência devido à expansão violenta (<i>violent bloating</i>) durante a queima, não sendo considerada qualificada. O valor máximo de resistência à compressão foi de 6,9 Mpa.
(Zhong et al., 2024)	Cerâmica não sinterizada	<i>Filler</i>	Após ativação da cinza volante o material ativado é misturado aos RMFs, CGs e aditivos auxiliares (cal viva, gesso, cimento e pó de alumínio). A mistura é processada em um granulador de disco. Os íons OH^- do NaOH quebram as ligações químicas Si-O-Al e Si-O-Si na estrutura amorfa da cinza volante e da CG. As substâncias ativas dissolvidas reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (gerado pela cal viva) para formar gel C-S-H e aluminato de cálcio hidratado.	O diferencial desta pesquisa é o foco no baixo consumo de energia e baixa emissão de carbono, ao eliminar totalmente a etapa de sinterização em altas temperaturas. A resistência do material é atingida através da ativação alcalina.	Formulação otimizada: Contendo 35% de RMF atingiu uma resistência à compressão de 2,27 MPa e absorção de água de 17,6%. O aumento do RMF melhora a densidade e reduz a absorção de água, mas quando a dosagem excede 35%, a resistência diminui, pois o excesso de rejeito adere à superfície dos materiais cimentícios e prejudica a formação dos produtos de hidratação.

Tabela 8: Trabalhos que estudam cerâmicas porosas funcionais

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Huang et al., 2025a)	Cerâmica porosa para isolamento térmico	Matéria-prima principal	Prepara-se uma polpa com o RMF e monômeros orgânicos, que é submetida a espumação mecânica por agitação. Em seguida é adicionado reagentes que criam uma rede orgânica tridimensional que "aprisiona" as bolhas de ar. O material é moldado e passa por processo de sinterização.	O trabalho desenvolve um método para fabricar cerâmicas porosas utilizando a técnica de <i>foam gel-casting</i> .	Dependendo da temperatura de sinterização, os materiais atingem entre 2,7 MPa e 15,4 Mpa. Devido à rede de poros complexa que dificulta a transferência de calor, a condutividade térmica é extremamente baixa, tornando o produto ideal para gestão térmica em edifícios e indústrias.
(Li <i>et al.</i> , 2025)	Cerâmica porosa para isolamento sonoro	Matéria-prima principal	Depois de compactados em moldes e prensados o material passa pelo processo de sinterização entre 1140 °C e 1200 °C.	O trabalho utiliza o RMF em conjunto com resíduo de casca de noz. Foca no controle dos componentes fundentes para evitar a densificação total do corpo cerâmico; buscando manter uma alta porosidade aberta e conectada para permitir que as ondas sonoras penetrem e sejam atenuadas nos canais de poros.	A amostra otimizada (sinterizada a 1160 °C) atingiu uma porosidade e densidade aparente de 63,87% e 1,19 g/cm ³ respectivamente. Apresentou excelente desempenho na faixa de frequência de 2500 Hz, sendo considerado um candidato para redução de ruídos em linhas ferroviárias de alta velocidade.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Ativação	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Li et al., 2021)	Cerâmica espumada de baixa densidade	Matéria-prima principal	Sinterização térmica (1090–1150 °C), com o aditivo de carbeto de silício (SiC) atuando como agente espumante através de reações de oxidação para gerar a porosidade.	Investiga a influência da temperatura de sinterização e do teor de carbeto de silício (SiC) nas propriedades físicas e na microestrutura do material.	Amostra ideal: 55% de RMF e 0,10% de SiC, sinterizada a 1130 °C. Densidade aparente de 0,77 g/cm ³ . Observou-se que, com o aumento da temperatura de sinterização, o tamanho médio dos poros aumentou de 0,50 mm para 3,57 mm.
(Chen et al., 2025)	Cerâmica porosa para isolamento térmico e sonoro	Matéria-prima principal	Protocolo de secagem crítica entre 70 °C e 90 °C. Em seguida passa pelo processo de sinterização térmica. (ativação mais eficiente foi identificada a 1160 °C,)	Foco em rejeitos ricos em biotita, explorando como a sua estrutura em camadas e a sua higroscopia (capacidade de absorver umidade) influenciam o processo de sinterização.	O trabalho identifica que a desidratação dessas camadas minerais causa microfissuras na matriz. A umidade residual é o fator que reduz o desempenho, reduzindo drasticamente a resistência mecânica se o protocolo de secagem não for rigoroso.

Os trabalhos apresentados na Tabela 6 demonstram que os resíduos da mineração de ferro também possuem potencial para aplicação na produção de tijolos em sistemas sem queima. Esses materiais dependem principalmente de mecanismos de compactação, cura e ativação química para garantir resistência mecânica. Nesse contexto, os RMFs atuam predominantemente como *filler* e substituto parcial da argila tradicional, sendo frequentemente utilizados em conjunto com outros resíduos industriais, como escória de alto-forno granulada moída (GGBS), escória de aciaria (BOF) e lama vermelha (RM). De modo geral, os resultados indicam que os tijolos produzidos atenderam aos requisitos mínimos de resistência mecânica e absorção de água estabelecidos pelas normas técnicas.

Entretanto, os trabalhos também mostram que o RMF atua majoritariamente como componente físico, sem participação significativa na formação de produtos de hidratação. Freitas *et al.* (2018), por exemplo, verificaram que a adição de pequenas quantidades de cimento aumentou significativamente a resistência mecânica dos tijolos, indicando a necessidade de materiais ligantes complementares para melhorar o desempenho estrutural. Em geral estudos da Tabela 6 demonstram que é possível produzir materiais classificados como ecológicos, principalmente devido ao baixo consumo energético e à redução das emissões de CO₂ proporcionadas pela eliminação da etapa de queima em altas temperaturas.

Os trabalhos apresentados na Tabela 7 demonstram que os resíduos possuem um bom potencial para aplicação na produção de argilas expandidas (tratadas como *ceramsites* nos trabalhos). Diferentemente dos sistemas cimentícios e produtos cerâmicos sem queima, nos quais o desempenho depende frequentemente da interação entre o RMF e os produtos de hidratação, a produção de ceramsitas ocorre predominantemente por rotas térmicas com participação fundamental dos rejeitos. De modo geral, os estudos indicam que o RMF desempenha funções químicas fundamentais durante o processo de sinterização. O material atua como fornecedor de sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e principalmente óxidos fundentes, como Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O e K₂O. Em altas temperaturas esses materiais formam uma fase líquida que aprisiona os gases liberados pelas reações térmicas internas. Como consequência, ocorre a expansão do material, fenômeno conhecido como *bloating*, responsável pela formação da estrutura porosa característica das ceramsitas. Os

autores da Tabela 7 relacionam diretamente a expansão controlada à formação de uma matriz vítrea estável e mecanicamente resistente, devido a formação de estruturas cristalinas estáveis como quartzo (SiO_2), coríndon (Al_2O_3) e espinélio (Al_2MgO_4).

Os trabalhos também demonstram que o desempenho final das ceramsitas depende fortemente do controle térmico do processo. Ma *et al.* (2025b) descrevem o processo é em três estágios principais. O primeiro envolve a remoção de água e início da combustão de carbono fixo (temperatura $< 400^\circ\text{C}$). Em seguida ocorre intensa decomposição mineralógica, liberando gases responsáveis pela futura expansão (temperatura $> 400^\circ\text{C} < 950^\circ\text{C}$). Após a decomposição acontece a formação da fase líquida e o efetivo processo de expansão (temperatura $> 950^\circ\text{C} < 1300^\circ\text{C}$). Segundo os autores, o equilíbrio entre a pressão interna dos gases e a tensão superficial da fase líquida é determinante para a estabilidade da estrutura porosa. Temperaturas excessivas ou expansão descontrolada podem comprometer a resistência mecânica do produto, como observado na ceramsita produzida apenas com RMF, que apresentou expansão violenta e desempenho insatisfatório (Ma *et al.*, 2025b).

A co-utilização com outros resíduos industriais aparece como estratégia central para estabilizar esse comportamento. Guo *et al.* (2023) utilizam cinzas volantes de carvão (CFA) juntamente com RMF para otimizar a formação de poros e controlar a viscosidade da fase líquida durante a sinterização. Já Ma *et al.* (2025a) e Ma *et al.* (2025b) exploram sistemas compostos por ganga de carvão (CG) e RMFs, obtendo ceramsitas produzidas exclusivamente com resíduos sólidos industriais. Nesses casos, a CG atua como agente auxiliar na geração de gases e na estruturação da porosidade, enquanto o RMF contribui principalmente com os óxidos fundentes responsáveis pela formação da fase líquida. Essa interação evidencia que o desempenho das ceramsitas depende da sinergia química estabelecida entre os diferentes resíduos utilizados, mesmo que o RMF apresente um papel fundamental no processo de sinterização.

Apesar dos resultados promissores, os estudos indicam que a produção de ceramsitas ainda depende de elevado consumo energético. Todos os trabalhos apresentados na Tabela 7 utilizam etapas prévias de moagem para adequação granulométrica do RMF, além de temperaturas elevadas de sinterização, com exceção

de Zhong *et al.* (2024). Nesse contexto, os autores propõem uma alternativa distinta ao desenvolver uma ceramsita não sinterizada baseada em ativação alcalina. O estudo elimina completamente a etapa térmica de alta temperatura, reduzindo significativamente o consumo energético e as emissões de carbono do processo. Embora o desempenho mecânico obtido seja inferior ao das ceramsitas sinterizadas, os autores demonstram que o material apresenta propriedades compatíveis com aplicações de agregados leves, indicando uma rota promissora para sistemas de menor impacto ambiental.

No caso da Tabela 8, os trabalhos apresentam uma abordagem distinta da observada na produção de ceramsitas. Enquanto as ceramsitas são produzidas por processos de pelletização em granuladores de disco, resultando em agregados esféricos, os estudos da Tabela 8 buscam o desenvolvimento de cerâmicas que são moldadas em geometrias específicas para suas análises. Em geral, eles também exploram o controle da porosidade como principal mecanismo funcional, porém por rotas distintas. Huang *et al.* (2025a), por exemplo, utilizam a técnica de *foam gel-casting*, em que a porosidade é introduzida mecanicamente antes da sinterização. Li *et al.* (2021) utilizam carbeto de silício (SiC) como agente espumante para gerar uma estrutura altamente porosa. Já Chen *et al.* (2025) investigam rejeitos ricos em biotita e demonstram que a estrutura lamelar desse mineral influencia diretamente o comportamento térmico durante a sinterização.

De forma geral, os trabalhos analisados nas tabelas demonstram que os resíduos da mineração de ferro possuem potencial para diferentes aplicações cerâmicas. Os estudos mostram que o desempenho desses materiais está diretamente relacionado à composição mineralógica do rejeito, ao controle da porosidade e às condições de processamento térmico. Enquanto os sistemas sem queima priorizam baixo consumo energético e estabilização química, os materiais sinterizados exploram transformações mineralógicas induzidas por altas temperaturas para obtenção de resistência mecânica, isolamento térmico e absorção sonora. Em conjunto, os resultados evidenciam que a versatilidade dos RMFs permite aplicações em diferentes segmentos da indústria cerâmica, fortalecendo novamente a influência da construção civil no reaproveitamento dos resíduos.

4.4.3. Outras aplicações

Além das rotas consolidadas em compósitos cimentícios e cerâmicos, a versatilidade dos resíduos de minério de ferro permite sua valorização em outros segmentos industriais e ambientais, ampliando o potencial de reutilização para além da construção civil convencional. Os estudos presentes na Tabela 9 exploram o potencial do RMF em infraestrutura de transportes, recuperação ambiental, pigmentos e outros materiais.

Tabela 9: Estudos alternativos de aplicação do RMF

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Xin et al., 2025)	Concreto asfáltico	Substituição de agregado fino	A pesquisa utiliza uma abordagem combinada de testes laboratoriais e simulações numéricas para avaliar o material sob condições climáticas extremas e tráfego sobrecarregado.	A mistura com 40% de RMF apresentou um aumento de 203% a 275% no módulo de compressão em relação ao grupo de controle. Apresentou uma vida útil à fadiga de mais de 21 vezes superior. Para o clima quente a mistura de 20% foi a mais ideal pois o excesso de RMF causou endurecimento excessivo e concentração de tensões, reduzindo a vida útil.
(Saldanha et al., 2023)	Ligante (<i>IOT Binder</i>)	Fonte de sílica para síntese de silicato de sódio	A pesquisa propõe o desenvolvimento de um ligante, produzido exclusivamente por resíduos, com o objetivo de estabilizar RMFs empilhados a seco. São produzidos um silicato de sódio alternativo e um metacaulim alternativo, após ativação térmica, que atuam, respectivamente, como ativador e precursor na matriz cimentícia.	A produção do <i>IOT Binder</i> reduziu o consumo de energia em mais de 70% na produção do ativador em comparação ao método convencional. Apresentou bom desempenho ambiental. Os testes de resistência à compressão simples demonstraram que ligante é eficaz na estabilização dos rejeitos, apresentando um desempenho mecânico equivalente ao do cimento álcali-ativado comercial para as mesmas dosagens.
(Hou et al., 2024)	Condicionador de solo (<i>FeOT-BC</i> compósito de RMF e biochar)	Fonte de óxidos de ferro	A pesquisa desenvolve um processo que integra as propriedades minerais dos RMFs com a estrutura orgânica e porosa do biochar (produzido a partir de casca de arroz) para promover o crescimento vegetal.	O composto FeOT-BC promoveu significativamente o crescimento das plantas de arroz desenvolvidas na pesquisa. Aumentou o pH, o teor de matéria orgânica e dos nutrientes disponíveis.
(Carvalho et al., 2023)	Geopolímero de base ácida	Agente precursor da reação	Foca na ativação ácida e investiga como o RMF fornece os átomos necessários para interagir com a solução ácida e formar novas fases ligantes. Para a análise de desempenho foram moldados corpos de prova (CPs) que passaram por cura térmica.	Os CPs curados a 60°C apresentaram maior densidade e melhor estabilidade de resistência ao longo do tempo em comparação aos curados a 80°C. A análise microestrutural confirmou a formação de fases cristalinas de berlinita (AlPO ₄) e possivelmente fosfato férrico (FePO ₄), resultantes da interação entre o ácido e o RMF.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Ferreira et al., 2022)	Argamassa geopolimérica	Agregado e <i>filler</i>	A pesquisa investiga o reaproveitamento de RMF como agregado na produção de geopolímeros baseados em metacaulim (MK) ativados por uma solução alcalina.	O ferro presente no rejeito permanece na forma de óxidos e não substitui o alumínio na rede tetraédrica do geopolímero. A inclusão do rejeito como agregado gerou um ganho significativo de resistência. Enquanto a matriz pura atingiu 45 MPa aos 7 dias, a argamassa com RMF alcançou valores acima de 60 MPa no mesmo período. A adição do agregado reduziu a relação água/sólidos totais da mistura de 0,427 para 0,183.
(Galvão et al., 2018)	Tinta a base de água e rejeito	Pigmento e <i>filler</i>	Uso do rejeito em seu estado natural, sem a necessidade de processamento químico ou calcinação, sendo submetido apenas à secagem e ao destorroamento. Além disso, o trabalho foca na eliminação de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) e metais pesados tóxicos, comuns em tintas comerciais, resultando em um produto ecologicamente correto.	Custo significativamente inferior às tintas convencionais do mercado. Misturas utilizando PVA e Cal + PVA demonstraram excelente cobertura, resistência à abrasão e resistência ao intemperismo. Obtenção de diversas tonalidades.
(Khamseh et al., 2025)	Misturas rejeito-cimento para camadas de sub-base e subleito	Material granular principal	Utiliza um rejeito com granulometria extremamente fina e um teor de ferro (Fe_2O_3) elevado (46%). Traz a análise para o contexto do país de pesquisa (Irã).	Todas as misturas com acréscimo de cimento apresentaram resultados positivos em relação ao uso do RMF puro.
(Jiang et al., 2022)	<i>Filler</i> para subleito, estabilizado com cimento (<i>FCIT</i>)	Material principal (<i>filler</i>)	O RMF é usado como material granular inerte a ser estabilizado com cimento (10%), com o objetivo de substituir areia natural. Fibras são adicionadas para dar uma característica de 'falha dúctil', com o objetivo de aumentar a capacidade de deformação do pavimento.	As fibras apresentam papel fundamental para a resistência e ganhos de propriedades mecânicas do material. Quando apenas estabilizado com o cimento, o material se torna frágil, indicando que o RMF precisa de uma ação combinada com outro material (fibras) para que possa ser aplicado.

Autores	Produto Gerado	Função do RMF	Especificidade do Trabalho	Resultado e Desempenho
(Wang et al., 2025)	Geopolímero com absorção de onda eletromagnética	Fonte de ferro, sílica e alumínio	Produz geopolímero combinando a atuação do RMF com escória de alto-forno com ativação alcalina. Explora a adição de aditivos e o alto teor de óxido de ferro para converter ondas eletromagnéticas em corrente e calor.	Sem os aditivos absorventes, a resistência chega a 60,5 MPa, mas com a adição cai para cerca de 30 Mpa, mas ainda atende aos padrões para materiais de construção. O material produzido sem aditivos ainda possui propriedades de absorção de ondas eletromagnéticas, embora em um nível significativamente menor e o foco do trabalho é avaliar o uso dos aditivos na matriz.
(Sá et al., 2022)	Misturas rejeito-cimento para camadas de sub-base e subleito	Estabilizador granulométrico	O estudo avalia a incorporação de RMF em misturas de solo-cimento para aplicação em camadas de pavimentação. Foca na combinação de estabilização granulométrica e química para melhorar as propriedades mecânicas de solos.	Misturas com 10% e 20% de RMF superaram os requisitos normativos mínimos, atingindo valores de resistência que chegam ao dobro do padrão exigido. A mistura com 10% de RMF apresentou um ganho de 6% na resistência à compressão.
(Wei et al., 2022)	Mastique asfáltico para pavimento	<i>Filler</i> mineral fino	O trabalho aborda a substituição total de <i>filler</i> mineral de calcário por RMF.	Devido ao seu tamanho de partícula reduzido e à sua elevada área superficial específica, o RMF promove uma maior adsorção de asfalto em torno das partículas. A presença do RMF elevou a taxa de recuperação elástica, indicando uma resposta mais rápida e eficiente às cargas de tráfego. Testes de lixiviação confirmaram que o material não apresenta riscos de contaminação ambiental.

Diferentemente dos capítulos anteriores, nos quais predominavam aplicações estruturais tradicionais, os trabalhos da Tabela 9 apresentam abordagens mais especializadas e frequentemente associadas ao desenvolvimento de novos materiais e tecnologias sustentáveis. As aplicações em infraestrutura rodoviária exploram o uso do RMF em diferentes camadas do pavimento. Nesse contexto, os estudos de Jiang *et al.* (2022), Khamseh *et al.* (2025) e Sá *et al.* (2022) concentram-se na estabilização do rejeito com cimento e aditivos para compor camadas de suporte, como subleito e sub-base, visando o aumento da rigidez. Complementarmente, os trabalhos de Wei *et al.* (2022) e Xin *et al.* (2025) direcionam o uso do RMF para misturas asfálticas, atuando como substitutos de agregados miúdos e *fillers* minerais para aprimorar a durabilidade e a estabilidade térmica dos pavimentos em suas camadas mais superficiais.

Outra linha recorrente nos trabalhos envolve o desenvolvimento de ligantes alternativos e geopolímeros visando reduzir a dependência do cimento Portland convencional. Carvalho *et al.* (2023), Ferreira *et al.* (2022) e Saldanha *et al.* (2023) compartilham esse objetivo, embora utilizem mecanismos distintos. Saldanha *et al.* (2023) desenvolvem um sistema completamente baseado em resíduos minerais, utilizando o RMF como fonte de sílica para produção de um silicato de sódio alternativo empregado na estabilização de rejeitos por empilhamento a seco. Carvalho *et al.* (2023) exploram a ativação ácida com ácido fosfórico, investigando como o elevado teor de ferro do rejeito contribui para a formação de fases cristalinas ligantes em geopolímeros. Já Ferreira *et al.* (2022) utilizam o RMF apenas como agregado inerte em matrizes geopoliméricas de metacaulim, demonstrando, que os óxidos de ferro presentes no rejeito permanecem quimicamente estáveis e não participam das reações de polimerização quando não ativados.

Além dessas aplicações, outros estudos exploram usos mais específicos. Hou *et al.* (2024) desenvolvem um material voltado para o setor agrícola, em que o RMF atua como um precursor de ferro para o condicionamento de solo, favorecendo o desenvolvimento de espécies. O trabalho de Galvão *et al.* (2018) reforça novamente o potencial da construção civil em absorver resíduos como matéria prima, mas inova em relação aos outros trabalhos, sendo o único que aborda o potencial de pigmentação do RMF para o desenvolvimento de tintas. Já Wang *et al.* (2025)

aproveitam a condutividade conferida pelo ferro presente no RMF, além dos aditivos e outros componentes, para criar materiais de construção com capacidades de blindagem contra radiação, através do desenvolvimento de um geopolímero capaz de absorver ondas eletromagnéticas.

De forma geral, os trabalhos analisados demonstram que o reaproveitamento dos resíduos da mineração de ferro possui aplicações diversificadas e não se limita apenas à substituição de materiais convencionais. As pesquisas mostram que características como granulometria, densidade, composição química e teor de óxidos de ferro permitem aplicações em diferentes setores da engenharia e da indústria. Além disso, praticamente todos os estudos justificam o reaproveitamento dos RMFs como uma estratégia para reduzir os impactos associados às barragens de rejeito, minimizando riscos ambientais e diminuindo a necessidade de extração de recursos naturais. Nesse contexto, os resultados reforçam que os RMFs podem atuar não apenas como resíduos passíveis de reaproveitamento, mas como materiais capazes de desempenhar funções técnicas específicas em sistemas construtivos, ambientais e industriais.

4.5. CO-UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS E GANHO AMBIENTAL

Os trabalhos analisados demonstram que a utilização de diferentes resíduos industriais em conjunto com os RMFs tornou-se uma das principais estratégias para ampliar a viabilidade técnica e ambiental do reaproveitamento desses materiais. Em vez de utilizar o rejeito de forma isolada, grande parte das pesquisas propõe sistemas multirresiduais, nos quais diferentes resíduos são combinados para compensar limitações químicas, físicas e mineralógicas entre si. Essa abordagem aparece em materiais cimentícios, tijolos, cerâmicas e aplicações geotécnicas. De modo geral, os estudos mostram que resíduos ricos em aluminossilicatos, como cinzas volantes (FA), escória de alto-forno granulada moída (GGBS) e lama vermelha (RM), são utilizados para compensar a baixa reatividade natural de parte dos RMFs, favorecendo a formação de fases cimentícias e melhorando o desempenho mecânico dos materiais produzidos. Em contrapartida, o próprio rejeito de minério de ferro atua como fornecedor de sílica, óxidos fundentes e material granular, contribuindo para estabilidade dimensional, preenchimento de vazios e ajuste granulométrico dos sistemas (Guo *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2025b; Wang *et al.*, 2023; Zhong *et al.*, 2024).

Essa complementaridade entre resíduos é observada em diferentes rotas de reaproveitamento. Beulah *et al.* (2025), Freitas *et al.* (2018) e H.K.; Hossiney (2022) por exemplo, utilizam combinações entre RMF, escórias siderúrgicas, cinzas volantes e lama vermelha para produção de tijolos e blocos sustentáveis. Nesses sistemas, os resíduos industriais mais reativos compensam a natureza predominantemente inerte dos rejeitos arenosos, permitindo a formação de matrizes cimentícias estáveis mesmo em materiais sem queima, através de formação da fase ligante devido às reações de álcali-ativação. Já nos estudos voltados à produção de ceramsitas, Guo *et al.* (2023), Ma *et al.* (2025^a) e Ma *et al.* (2025^b) demonstram que resíduos como cinzas volantes e ganga de carvão auxiliam no controle da expansão térmica, na formação de poros e na redução da temperatura de sinterização, através da composição rica em aluminossilicatos, que compensa o teor de alumina do rejeito de ferro e da combustão do carbono fixo da ganga.

Em aplicações ambientais e geotécnicas, outros materiais, como biochar, sedimentos de dragagem e resíduos de demolição, também são utilizados em conjunto com os RMFs para melhorar propriedades físicas, controlar o pH ou aumentar a estabilidade dos sistemas (Hou *et al.*, 2024; Mymrin *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2022). Dessa forma, a literatura evidencia que a co-utilização não ocorre apenas como alternativa de descarte conjunto, mas principalmente como uma estratégia de sinergia química e física entre resíduos industriais.

Além dos ganhos técnicos, os estudos analisados demonstram que uma das principais motivações para essas pesquisas está associada aos benefícios ambientais obtidos pelo reaproveitamento dos resíduos. Diversos autores utilizam metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ferramenta amplamente empregada para mensurar os impactos ambientais associados a produtos e processos, para quantificar os benefícios ambientais do reaproveitamento dos resíduos (Guo *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2025^b; Liu *et al.*, 2023; Saldanha *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2025^a). Liu *et al.* (2023) e Zhao *et al.* (2025^a), por exemplo, identificam reduções significativas no Potencial de Aquecimento Global (GWP) e em indicadores associados à formação de ozônio, quando agregados naturais são substituídos pelos rejeitos. Isso ocorre porque a substituição mitiga a necessidade de extração e beneficiamento de recursos naturais finitos, processos que demandam alto consumo de energia e geram emissões

elevadas de poluentes. Huang *et al.* (2025b) e Saldanha *et al.* (2023) demonstram que ligantes alternativos produzidos com resíduos apresentam menor consumo energético e menor demanda por recursos naturais em comparação a aglomerantes convencionais, tornando-se uma rota mais sustentável que o uso do Cimento Portland. Huang *et al.* (2025b) relatam reduções expressivas de carbono incorporado e energia incorporada em sistemas ativados alcalinamente. Já Freitas *et al.* (2018) destacam a possibilidade de geração de créditos de carbono associados à redução das emissões de CO₂ em tijolos sem queima.

Outro aspecto recorrente na literatura está relacionado à preservação de recursos naturais. Diversos trabalhos apontam que o reaproveitamento dos RMFs reduz diretamente a necessidade de extração de areia natural, argila e agregados pétreos, mitigando impactos associados à abertura de jazidas e pedreiras. Rao; Chandar (2021) e Wang *et al.* (2024b) ressaltam que o uso de rejeitos como agregados contribui para reduzir erosão do solo, emissão de poeira e degradação da vegetação superficial provocadas pela mineração convencional de materiais naturais. Sá *et al.* (2022) complementam essa análise ao demonstrar que aplicações em pavimentação podem poupar milhares de toneladas de recursos naturais ao longo de quilômetros construídos.

Já Mymrin *et al.* (2022) defendem sistemas produzidos exclusivamente com resíduos industriais, eliminando completamente a necessidade de matérias-primas virgens em determinados produtos, quando possível. Os trabalhos também associam o reaproveitamento dos RMFs à mitigação dos impactos ambientais relacionados às barragens de rejeito. Guo *et al.* (2023) destacam que a utilização em larga escala desses materiais ajuda a reduzir riscos associados à disposição contínua dos rejeitos, como contaminação de águas subterrâneas, emissão de poeira e degradação das áreas próximas às barragens.

De forma geral, os estudos analisados mostram que a co-utilização de resíduos industriais associada aos rejeitos de minério de ferro representa uma estratégia importante dentro dos princípios da economia circular. A combinação entre resíduos permite reduzir simultaneamente o consumo de matérias-primas naturais, as emissões de gases de efeito estufa e os impactos associados à disposição desses resíduos. Embora ainda existam desafios relacionados ao consumo energético de

algumas rotas de processamento e à necessidade de estudos de durabilidade em longo prazo, os trabalhos indicam que os RMFs possuem potencial para atuar não apenas como substitutos de materiais convencionais, mas como componentes estratégicos no desenvolvimento de produtos de menor impacto ambiental.

5. CONCLUSÃO

A análise sistemática resultou na seleção de 50 artigos científicos produzidos nos últimos 15 anos que tratam do reaproveitamento dos resíduos da mineração de ferro. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar os principais tipos de resíduos estudados, suas características, as rotas de reaproveitamento mais recorrentes e as limitações ainda existentes para sua aplicação em maior escala. De modo geral, os estudos analisados confirmam que os resíduos da mineração de ferro apresentam elevado potencial de valorização tecnológica, especialmente quando suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e granulométricas são adequadamente caracterizadas e direcionadas às aplicações compatíveis. Nesse sentido, o reaproveitamento desses materiais não é apenas uma alternativa de destinação, mas uma estratégia de reinserção de resíduos em novos ciclos produtivos.

A análise bibliométrica demonstrou que a maior parte do volume de produção se concentra entre China e Brasil. Além disso, os estudos começaram a ser mais expressivos após os eventos com barragens de rejeito que aconteceram no estado de Minas Gerais. Um ponto negativo é que os estudos nacionais ainda se concentram majoritariamente em resíduos provenientes de Minas Gerais, o que evidencia a necessidade de pesquisas com materiais oriundos de outras regiões produtoras, a fim de contemplar diferentes contextos geológicos e operacionais.

A análise também evidenciou que a produção científica sobre o tema está concentrada principalmente na área de materiais de construção. O que foi comprovado durante a revisão da literatura. Esse resultado evidencia que a construção civil é o principal setor para absorção desses resíduos, tanto pela grande demanda por matérias-primas minerais quanto pela possibilidade de incorporar volumes significativos de material em materiais de construção, como os compósitos cimentícios e cerâmicos, e também em áreas da geotecnia e infraestrutura.

Considerando que a construção civil também é responsável por elevado consumo de recursos naturais e geração de impactos ambientais, a incorporação de resíduos da mineração de ferro nesse setor cria uma possibilidade de benefício mútuo:

reduz a pressão sobre áreas de disposição da mineração e, ao mesmo tempo, diminui a demanda por matérias-primas naturais tradicionalmente utilizadas na construção.

Ao longo de leitura dos trabalhos foram feitas as principais observações:

- A heterogeneidade dos resíduos foi um dos aspectos mais relevantes identificados ao longo da revisão. Mesmo quando provenientes de uma mesma cadeia produtiva, os rejeitos podem apresentar variações. Dessa forma, não é adequado tratar os resíduos da mineração de ferro como materiais homogêneos ou de comportamento previsível. Cada resíduo deve ser previamente caracterizado, pois suas propriedades determinam diretamente seu desempenho e sua viabilidade de aplicação;
- Entre os resíduos analisados, o rejeito arenoso foi o mais recorrente nos estudos selecionados, principalmente devido à sua compatibilidade com materiais granulares naturais, como areia e agregados. Entretanto, parte significativa dos trabalhos exige processos de moagem para ativação mecânica e adequação granulométrica. Nesse contexto, os rejeitos ultrafinos podem ser mais trabalhados, uma vez que já podem ser disponibilizados pelas mineradoras em granulometrias mais adequadas para determinadas aplicações, não eliminando completamente, mas reduzindo etapas de processamento;
- As lamas ou rejeitos ultrafinos também apresentaram grande potencial, especialmente em aplicações que exigem preenchimento de vazios, adensamento microestrutural ou participação em processos de ativação;
- Já o estéril ainda aparece de forma pouco expressiva na literatura, apesar de representar um volume significativo na atividade minerária. Essa baixa presença indica uma lacuna importante e aponta para a necessidade de ampliar os estudos voltados ao reaproveitamento desse tipo de resíduo;
- A co-utilização de resíduos industriais foi identificada como uma estratégia recorrente e relevante. A combinação do RMF com cinzas volantes, escórias e outros resíduos pode compensar limitações individuais dos materiais e melhorar propriedades mecânicas, químicas

e ambientais dos produtos desenvolvidos. Essa abordagem reforça os princípios da economia circular, pois amplia a possibilidade de reaproveitamento simultâneo de diferentes resíduos e reduz a dependência de matérias-primas naturais;

- Os compósitos cimentícios constituem o principal grupo de aplicação identificado. Os estudos demonstram que o RMF pode ser utilizado como agregado miúdo, agregado graúdo, *filler* ou material cimentício suplementar. No entanto, esses resultados dependem fortemente do teor de substituição adotado, uma vez que dosagens elevadas podem comprometer a trabalhabilidade, o empacotamento das partículas e o desempenho final das matrizes;
- Quando submetido a processos de ativação mecânica, química ou inserido em matrizes alcalinas favoráveis, o RMF pode apresentar comportamento parcialmente reativo e contribuir para a formação de produtos de hidratação. Ainda assim, a revisão indica que o material, em geral, não se comporta como um ligante altamente ativo. Em muitos trabalhos, sua contribuição como *filler* e otimizador físico da microestrutura se mostrou mais relevante que sua participação química. Dessa forma, o uso do RMF como material cimentício suplementar deve ser avaliado com cautela, considerando o tipo de ativação, o consumo energético envolvido e o desempenho obtido;
- Os compósitos cerâmicos representam outra rota importante de aproveitamento. Para a produção de materiais porosos sinterizados o teor de ferro presente no RMF desempenha papel relevante. Os óxidos de ferro contribuem para a formação de fases fundentes e ajudam a controlar a porosidade para a obtenção de materiais com propriedades desejadas (térmicas, acústicas e estruturais). Apesar do consumo energético associado à queima em altas temperaturas, a utilização de volumes significativos de resíduos nesses produtos pode representar um ganho ambiental relevante;
- O teor de ferro também se mostrou relevante no trabalho que explora o condicionamento do solo. Esse potencial ainda é pouco explorado e pode representar uma linha promissora para pesquisas futuras;

- Apesar dos resultados promissores, grande parte dos estudos ainda permanece em escala laboratorial. Considerando o volume de pesquisas voltadas aos compósitos cimentícios e aos agregados cerâmicos, por exemplo, torna-se necessário avançar para estudos em escala piloto, aplicações reais, análises de durabilidade em longo prazo, avaliação econômica e estudos de logística. Esse avanço é essencial para verificar se os resultados obtidos em laboratório podem ser transferidos para condições industriais e construtivas reais.
- Como limitação do modelo de pesquisa, destaca-se que os resultados obtidos estão diretamente relacionados à estratégia de busca adotada para a seleção dos trabalhos. Embora a combinação de palavras-chave tenha sido definida com o objetivo de abranger os principais estudos relacionados ao reaproveitamento de resíduos da mineração de ferro, é possível que trabalhos relevantes para a área não tenham sido contemplados, por utilizarem termos diferentes dos adotados. Dessa forma, pesquisas futuras podem ampliar o escopo da revisão por meio da adoção de estratégias de busca mais abrangentes.

REFERÊNCIAS

- ABBADI, A.; MUCSI, G. A review on complex utilization of mine tailings: Recovery of rare earth elements and residue valorization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 113118, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113118>
- ALMADA, B. S.; DA SILVA SILVEIRA MELO, H.; DUARTE, M. S.; AGUILAR, M. T. P.; GARCIA, D. C. S.; SILVA, G. J. B.; DOS SANTOS, W. J. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1947–1962, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.070>
- ALMEIDA, J.; MOURA, M.; MAGNAGO, L.; ROCHA, A.; COELHO, E.; FERREIRA, S.; LELIS, M. D. F.; DE FREITAS, M. Sustainable Recycling of Spent Li-Ion Batteries and Iron Ore Tailings for Cobalt Ferrite Synthesis and Its Dual Applications as a Photocatalyst in Solar Photo-Fenton Process and an Electrochemical Sensor. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20240137>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- ALMG, ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS. Empilhamento de rejeitos minerários também representa perigo. 2022. Disponível em: https://www.almg.gov.br/acompanhe/noticias/arquivos/2022/03/31_meio_ambiente_mineracao_empilhamento_seco_rejeitos_mina_pau_branco_vallourec. Acesso em: 21 jan. 2026.
- AMARAL, J. **A Influência da mineração nos municípios do Quadrilátero Ferrífero / MG – Brasil: uma análise a partir da evolução do uso e ocupação do solo e do desenvolvimento socioeconômico populacional, entre os anos de 1980 e 2022**. 2024. - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.5081>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- ANM, AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>
- ANM, AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília, DF, 2025. Anuário. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>.
- ARAUJO, A. C.; AMARANTE, S. C.; SOUZA, C. C.; SILVA, R. R. R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v. 112, n. 1, p. 54–64, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/037195503225011439>
- ARAUJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C. Reagents in iron ores flotation. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 2, p. 219–224, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.023>

ARAÚJO, F.; TABORDA-LLANO, I.; NUNES, E.; SANTOS, R. Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications. **Geosciences**, v. 12, n. 9, p. 319, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**, ASTM D2487. West Consh, 2017.

AUSTRALIA. **World Rankings | Geoscience Australia**. [s. l.], 2025. Disponível em: <https://www.ga.gov.au/aimr2025/world-rankings>.

BEULAH, M.; SUDHIR, M. R.; PRADHAN, A.; SAJI, J. Assessment of mechanical and micro structural analysis of iron ore tailings and red mud sustainable bricks using multiple linear regression. **Discover Materials**, v. 5, n. 1, p. 51, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00212-y>

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

CARMIGNANO, O.; VIEIRA, S.; TEIXEIRA, A. P.; LAMEIRAS, F.; BRANDÃO, P. R.; LAGO, R. Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>. Acesso em: 21 jan. 2026.

CARVALHO, A. R. D.; CALDERÓN-MORALES, B. R. D. S.; BORBA JÚNIOR, J. C.; OLIVEIRA, T. M. D.; SILVA, G. J. B. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. **Construction and Building Materials**, v. 403, p. 133078, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078>

CEZAR, B. F.; PIMENTA, A. R.; MAGALHÃES, M. da S. Utilization of iron ore waste rock in strain-hardening cementitious composites: A study on material characteristics and composite performance. **Construction and Building Materials**, v. 505, p. 144663, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144663>

CHEN, F.; LIU, Y.; YU, W.; SUN, S.; WU, J.; LI, N.; ZHAO, X.; CUI, C.; CHEN, X. The regulatory mechanism of biotite layered structure and its hygroscopicity on the sintering and properties of iron ore tailings-based porous ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 1047, p. 184961, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184961>

CNMP, C. N. do M. P. (org.). **Diretrizes para valoração de danos ambientais**. Brasília, DF: Conselho Nacional do Ministério Público, 2021.

DUTHIE, A. C. R.; LINS, F. A. F. Brasil Mineral. **A Economia Circular e sua Relação com a Mineração**, v. 374, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a circular economy - Business rationale for an accelerated transition**. , 2015.

EUGÊNIO, T. M. C.; FAGUNDES, J. F.; VIANA, Q. S.; VILELA, A. P.; MENDES, R. F. Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122484>

EUGENIO, T. M. C.; HENRIQUES, A. B.; MENDES, R. F. Use of iron ore tailings as partial replacement for cement on cementitious composites production with vegetable fibers. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134667, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134667>

FEAM, FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Manual de Fiscalização: Programa de Gestão de Barragens**. Belo Horizonte, 2023.

FERREIRA, I. C.; GALÉRY, R.; HENRIQUES, A. B.; PAULA DE CARVALHO TEIXEIRA, A.; PRATES, C. D.; LIMA, A. S.; SOUZA FILHO, I. R. Reuse of iron ore tailings for production of metakaolin-based geopolymers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 4194–4200, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.192>

FILHO, J. N. S.; DA SILVA, S. N.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017104, 2017. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001937](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001937)

FREITAS, S. M. A. C. de; SOUSA, L. N.; DINIZ, P.; MARTINS, M. E.; ASSIS, P. S. Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 5, p. 1087–1095, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1513-7>

GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412–422, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.313>

GONTIJO, M. D. Manuseio e aproveitamento de estéreis em mineração. **Revista Engenharia de Interesse Social**, v. 6, n. 8, p. 104–116, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36704/25256041/reis.v6i8.6005>

GUO, P.; ZHAO, Z.; LI, Y.; ZHANG, Y.; HE, T.; HOU, X.; LI, S. Co-utilization of iron ore tailings and coal fly ash for porous ceramsite preparation: Optimization, mechanism, and assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 348, p. 119273, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119273>

GUO, Y.; XU, X.; GUO, W. Utilization of sulfur iron ore tailing (SIOT) in GGBS-metakaolin based alkali-activated mortar. **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138139, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138139>

GUSMÃO, I. C. D. D.; BARRETO, A. H. D. S.; FERNANDES, R. T. V.; SILVA, M. D.; LIMA, V. K. P. D. **Os impactos ambientais causados pela atividade mineradora**. Congresso técnico-científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC, 2021.

H.K., T.; HOSSINEY, N. Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00973, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00973>

HOU, X.; ZHANG, Y.; LIU, X.; ZHOU, C.; LI, J.; KE, M. Preparation and application of soil conditioner using iron ore tailings-biochar composite material. **Alexandria Engineering Journal**, v. 94, p. 219–225, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.067>

HUANG, S.; PI, Z.; CAI, C.; LI, H. Utilization of high-sulfur iron ore tailings in cement mortar by considering the influence of curing temperature and tailing content. **Journal of Building Engineering**, v. 74, p. 106826, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106826>

HUANG, X.; LI, Q.; WU, Y.; GAO, Y.; HUANG, Z.; ZHANG, H. Foam gel-casting preparation of tailings porous ceramics for thermal insulation. **Ceramics International**, v. 51, n. 19, p. 29138–29145, 2025 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.04.119>

HUANG, X.; TIAN, Y.; JIANG, J.; MAO, A.; YANG, J.; LU, X.; ZHANG, J. Differential effects of iron ore tailings sand on the engineering properties and sustainability of OPC and alkali-activated binders ultra-high performance concrete: A multi-criteria performance evaluation. **Journal of Building Engineering**, v. 116, p. 114592, 2025 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114592>

IBRAM, INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineracao em Numeros 2024**. Brasil Instituto Brasileiro de Mineração, , 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em: 21 jan. 2026. Dados do setor mineral

JIANG, P.; CHEN, Y.; SONG, X.; LI, N.; WANG, W.; WU, E. Study on Compressive Properties and Dynamic Characteristics of Polypropylene-Fiber-and-Cement-Modified Iron-Ore Tailing under Traffic Load. **Polymers**, v. 14, n. 10, p. 1995, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14101995>

KHAMSEH, B.; SHOURIJEH, P. T.; BINESH, S. M. Strength and deformation characteristics of cement-stabilized Fe-rich fine iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 463, p. 140101, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140101>

KRAMPL, A. Journal Citation Reports. **Journal of the Medical Library Association**, v. 107, n. 2, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5195/jmla.2019.646>. Acesso em: 19 fev. 2026.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1083137, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>

LI, C.; ZHANG, S.; LIU, P.; LIN, S.; LI, H.-N.; TIAN, Y.; CHEN, W. Effect of tailing powder content on dynamic behavior of iron tailing porous concrete: An experimental study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e03635, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03635>

LI, K.; KOU, Y.; WANG, D.; BAI, R.; LUO, Q.; YANG, Z.; CHENG, Z. Preparation and characterization of iron ore tailings-based sound absorbing ceramics. **Materials Chemistry and Physics**, v. 344, p. 131189, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131189>

LI, L.; JIANG, T.; ZHOU, M.; CHEN, B.; CHEN, C. The influence of temperature and SiC content on the recycling of iron ore tailings for the preparation of value-added foam ceramics. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 1, p. 330–340, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01135-x>

LIANG, H.; LIU, J.; KANG, B.; ZHANG, Y.; HE, Y.; YANG, H. Optimizing 1-hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid and mechanically-activated iron ore tailings to prepare low-cost and retarded magnesium oxysulfate cement. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01631, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01631>

LIMA, N. P.; PERES, A. E. C.; MARQUES, M. L. S. Effect of Slimes on Iron Ores Flotation. **International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing**, v. 1, n. 2, p. 43–46, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5923/j.mining.20120102.04>

LIU, K.; WANG, S.; QUAN, X.; JING, W.; XU, J.; ZHAO, N.; LIU, B. Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01472, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01472>

LIU, K.; WANG, S.; QUAN, X.; JING, W.; XU, J.; ZHAO, N.; LIU, B.; YING, H. Industrial byproduct Iron ore tailings as ecofriendly materials in the utilization of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 372, p. 130813, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130813>

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM/COPM, 2010.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM/MCT, 2010.

LV, X.; LIN, Y.; CHEN, X.; SHI, Y.; LIANG, R.; WANG, R.; PENG, Z. Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings

utilized as dam concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126068, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126068>

MA, W.; PAN, J.; ZHU, D.; DONG, T.; GUO, Z.; YANG, C.; LI, S.; ZHANG, W. Properties optimization of high-strength ceramsite prepared from coal gangue and iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 493, p. 143294, 2025 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143294>

MA, W.; ZHANG, W.; PAN, J.; ZHU, D.; DONG, T.; GUO, Z.; YANG, C.; LI, S. Synergistic mechanism for preparation of high-performance ceramsite from coal gangue and iron ore tailings. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 201, p. 107591, 2025 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107591>

MARCONDES, R.; DA SILVA, S. L. R. O protocolo prisma 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, v. 18, n. 39, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21713/rbpg.v18i39.1894>

MATIOLO, E.; COUTO, H. J. B.; LIMA, N.; SILVA, K.; DE FREITAS, A. S. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. **Minerals Engineering**, v. 158, p. 106608, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106608>

MENG, X.; TANG, Z.; GAO, P.; ZHANG, Y. Mechanism analysis of hydrogen mineral phase-transformed iron ore tailings in cementitious materials: A study on hydration kinetics, mechanical properties, and microstructural characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 475, p. 141260, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141260>

MYMRIN, V.; PEDROSO, C. L.; PEDROSO, D. E.; ROLIM, P. H. B.; CATAI, R. E.; CARVALHO, K. Q. Eco-friendly cementless concrete from hazardous iron ore tailing and waste of cellulose-pulp, concrete demolition, and lime production. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 122, n. 2, p. 933–945, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09811-y>

OECD, E. O. on the T. P. C. **Environmental Outlook on the Triple Planetary Crisis: Stakes, Evolution and Policy Linkages**. [S. l.]: OECD Publishing, 2025. (OECD Environmental Outlook). *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/257ffbb6-en>. Acesso em: 30 jan. 2026.

OLIVEIRA, C. S. D.; SILVA, G. F. D.; SOUZA, É. M. A. D.; SOUSA, J. D. L. C.; RESENDE, S. I. D. M.; DINIZ, H. A. G. Volatilidade dos preços das commodities minerais: minério de ferro. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 2, p. e4694, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i2.4694>

PAGE, M. J. *et al.* A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 46, p. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112>

PAIS, P. S. M.; GOMES, M. F. M.; CORONEL, D. A. Análise da competitividade das exportações brasileiras de minério de ferro, de 2000 a 2008. **RAM. Revista de**

Administração Mackenzie, v. 13, n. 4, p. 121–145, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-69712012000400006>

SÁ, T. S. W.; ODA, S.; BALTHAR, V. K. C. B. L. M.; FILHO, R. D. T. Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. **Construction and Building Materials**, v. 342, p. 128072, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128072>

SALDANHA, R. B.; CAICEDO, A. M. L.; DE ARAÚJO, M. T.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MONCALEANO, C. J.; SILVA, J. P. S.; CONSOLI, N. C. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130008, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130008>

SHUBHANANDA RAO, P.; CHANDAR, K. R. Development of energy efficient organic bricks in construction using IOT and perlite. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 14, n. 4, p. 865–873, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1838662>

TIAN, X.; WANG, C.; ASRAH, H.; HAN, L. C.; ZHENG, Y. Investigating the grinding characteristics of vanadium-titanium iron ore tailings for sustainable utilization in cementitious material preparation. **Alexandria Engineering Journal**, v. 101, p. 78–89, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.057>

WANG, H.; GU, X.; LIU, J.; ZHU, Z.; WANG, S.; XU, X.; MENG, J. Enhancement mechanism of micro-iron ore tailings on mechanical properties and hydration characteristics of cement-steel slag system. **Journal of Building Engineering**, v. 79, p. 107882, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107882>

WANG, H.; GU, X.; XU, X.; LIU, J.; ZHU, Z.; WANG, S. The effects of iron tailings on steel slag-based cementitious systems: Strength, hydration products, and volume stability. **Journal of Building Engineering**, v. 91, p. 109702, 2024 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109702>

WANG, L.; TIAN, H.; LEI, W.; DAI, N.; WANG, H. Development of high-strength ceramsite via sintering of iron ore tailings: Process optimization and properties. **Construction and Building Materials**, v. 457, p. 139440, 2024 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139440>

WANG, M.; WANG, Q.; MAO, J.; XU, S.; SHI, Z. Study on water-repellent and corrosion-resistant properties of cement mortar using superhydrophobic iron ore tailings. **Journal of Building Engineering**, v. 62, p. 105360, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105360>

WANG, T.; NING, X.; YANG, L.; RAO, F.; JIANG, K. The synthesis of an iron tailings-based geopolymers with synergistic electromagnetic wave consumption property. **Environmental Research**, v. 268, p. 120744, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120744>

WEI, Z.; JIA, Y.; WANG, S.; LI, Z.; LI, Y.; WANG, X.; GAO, Y. Utilization of iron ore tailing as an alternative mineral filler in asphalt mastic: High-temperature performance and environmental aspects. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, p. 130318, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130318>

XIN, Y.; XIANGZHI, L.; ZIDONG, Z.; XINYU, N. Effects of different dosages of iron ore tailings on the fatigue performance of high-strength modified AC asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 494, p. 143367, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143367>

ZHANG, D.; NING, X.; QIU, G.; DENG, J.; DAI, W.; KUANG, Z.; HU, B. Impurity migration and removal mechanisms in magnetization roasting of refractory iron Ores: A review. **Minerals Engineering**, v. 237, p. 110038, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.110038>

ZHANG, Y.; LI, Z.; GU, X.; NEHDI, M. L.; MARANI, A.; ZHANG, L. Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 72, p. 106585, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106585>

ZHANG, Y.; LIU, B.; GU, X.; NEHDI, M. L.; ZHANG, L. V. Mechanochemical activation of iron ore tailing-based ternary supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 346, p. 128420, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128420>

ZHANG, Z.; SHRESTHA, A.; CAI, Z.; AHMAD, N.; YU, K.; LI, L. Development of high-strength engineered cementitious composites using iron sand: Mechanical and shrinkage properties. **Journal of Building Engineering**, v. 95, p. 110272, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110272>

ZHAO, G.; PENG, F.; DING, Y.; NIE, Z.; WEI, F.; WANG, C.; DING, S. Application of iron tailings as fine aggregates in cast-in-situ concrete: The durability evaluation under sulfate and chloride combined corrosion. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 46, p. e01775, 2025 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01775>

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540–548, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>

ZHAO, Z.; CHENG, D.; KANG, X.; CHENG, N.; ZHU, C.; LI, H.; XU, M. Study on the performance degradation of iron ore tailings concrete under microwave irradiation. **Construction and Building Materials**, v. 492, p. 142976, 2025 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142976>

ZHONG, M.; MENG, J.; NING, B.; NA, F.; CUI, T.; SHI, X.; CUI, T. Preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue-iron ore tailings non-sintering ceramsite. **Construction and Building Materials**, v. 426, p. 136209, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136209>

ZOU, X.; FU, L.; SONG, J.; XU, G.; BAI, D. High-temperature thermochemical conversion of iron ore tailings into diopside and akermanite-based composite materials. **Advanced Powder Technology**, v. 35, n. 11, p. 104670, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104670>

APÊNDICE A – TRABALHOS ANALISADOS

Título	Referência
Utilization of iron ore waste rock in strain-hardening cementitious composites: A study on material characteristics and composite performance	(Cezar <i>et al.</i> , 2025)
Differential effects of iron ore tailings sand on the engineering properties and sustainability of OPC and alkali-activated binders ultra-high performance concrete: A multi-criteria performance evaluation	(Huang <i>et al.</i> , 2025b)
The regulatory mechanism of biotite layered structure and its hygroscopicity on the sintering and properties of iron ore tailings-based porous ceramics	(Chen <i>et al.</i> , 2025)
Application of iron tailings as fine aggregates in cast-in-situ concrete: The durability evaluation under sulfate and chloride combined corrosion	(Zhao <i>et al.</i> , 2025a)
Assessment of mechanical and micro structural analysis of iron ore tailings and red mud sustainable bricks using multiple linear regression	(Beulah <i>et al.</i> , 2025)
Preparation and characterization of iron ore tailings-based sound absorbing ceramics	(Li <i>et al.</i> , 2025)
Effects of different dosages of iron ore tailings on the fatigue performance of high-strength modified AC asphalt mixtures	(Xin <i>et al.</i> , 2025)
Properties optimization of high-strength ceramsite prepared from coal gangue and iron ore tailings	(Ma <i>et al.</i> , 2025a)
Study on the performance degradation of iron ore tailings concrete under microwave irradiation	(Zhao <i>et al.</i> , 2025b)
Synergistic mechanism for preparation of high-performance ceramsite from coal gangue and iron ore tailings	(Ma <i>et al.</i> , 2025b)
Foam gel-casting preparation of tailings porous ceramics for thermal insulation	(Huang <i>et al.</i> , 2025a)
Mechanism analysis of hydrogen mineral phase-transformed iron ore tailings in cementitious materials: A study on hydration kinetics, mechanical properties, and microstructural characteristics	(Meng <i>et al.</i> , 2025)

The synthesis of an iron tailings-based geopolymer with synergistic electromagnetic wave consumption property	(Wang <i>et al.</i> , 2025)
Strength and deformation characteristics of cement-stabilized Fe-rich fine iron ore tailings	(Khamseh <i>et al.</i> , 2025)
Development of high-strength ceramsite via sintering of iron ore tailings: Process optimization and properties	(Wang <i>et al.</i> , 2024b)
Effect of tailing powder content on dynamic behavior of iron tailing porous concrete: An experimental study	(Li <i>et al.</i> , 2024)
High-temperature thermochemical conversion of iron ore tailings into diopside and akermanite-based composite materials	(Zou <i>et al.</i> , 2024)
Development of high-strength engineered cementitious composites using iron sand: Mechanical and shrinkage properties	(Zhang <i>et al.</i> , 2024)
Utilization of sulfur iron ore tailing (SIOT) in GGBS-metakaolin based alkali-activated mortar	(Guo <i>et al.</i> , 2024)
The effects of iron tailings on steel slag-based cementitious systems: Strength, hydration products, and volume stability	(Wang <i>et al.</i> , 2024a)
Investigating the grinding characteristics of vanadium-titanium iron ore tailings for sustainable utilization in cementitious material preparation	(Tian <i>et al.</i> , 2024)
Preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue-iron ore tailings non-sintering ceramsite	(Zhong <i>et al.</i> , 2024)
Preparation and application of soil conditioner using iron ore tailings-biochar composite material	(Hou <i>et al.</i> , 2024)
Use of iron ore tailings as partial replacement for cement on cementitious composites production with vegetable fibers	(Eugenio <i>et al.</i> , 2024)
Co-utilization of iron ore tailings and coal fly ash for porous ceramsite preparation: Optimization, mechanism, and assessment	(Guo <i>et al.</i> , 2023)
Enhancement mechanism of micro-iron ore tailings on mechanical properties and hydration characteristics of cement-steel slag system	(Wang <i>et al.</i> , 2023)
Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid	(Carvalho <i>et al.</i> , 2023)

Utilization of high-sulfur iron ore tailings in cement mortar by considering the influence of curing temperature and tailing content	(Huang <i>et al.</i> , 2023)
Utilization of iron ore tailings with high volume in green concrete	(Zhang <i>et al.</i> , 2023)
Industrial byproduct Iron ore tailings as ecofriendly materials in the utilization of cementitious composites	(Liu <i>et al.</i> , 2023)
Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment	(Saldanha <i>et al.</i> , 2023)
Study on water-repellent and corrosion-resistant properties of cement mortar using superhydrophobic iron ore tailings	(Wang <i>et al.</i> , 2022)
Optimizing 1-hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid and mechanically-activated iron ore tailings to prepare low-cost and retarded magnesium oxysulfate cement	(Liang <i>et al.</i> , 2022)
Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concrete	(Liu <i>et al.</i> , 2022)
Mechanochemical activation of iron ore tailing-based ternary supplementary cementitious materials	(Zhang <i>et al.</i> , 2022)
Eco-friendly cementless concrete from hazardous iron ore tailing and waste of cellulose-pulp, concrete demolition, and lime production	(Mymrin <i>et al.</i> , 2022)
Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure	(Sá <i>et al.</i> , 2022)
Alkali-activated bricks made with mining waste iron ore tailings	(H.K.; Hossiney, 2022)
Reuse of iron ore tailings for production of metakaolin-based geopolymers	(Ferreira <i>et al.</i> , 2022)
Study on Compressive Properties and Dynamic Characteristics of Polypropylene-Fiber-and-Cement-Modified Iron-Ore Tailing under Traffic Load	(Jiang <i>et al.</i> , 2022)
Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil	(Almada <i>et al.</i> , 2022)

Utilization of iron ore tailing as an alternative mineral filler in asphalt mastic: High-temperature performance and environmental aspects	(Wei <i>et al.</i> , 2022)
Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles	(Eugênio <i>et al.</i> , 2021)
Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings utilized as dam concrete aggregates	(Lv <i>et al.</i> , 2021)
Development of energy efficient organic bricks in construction using IOT and perlite	(Rao; Chandar, 2021)
The influence of temperature and SiC content on the recycling of iron ore tailings for the preparation of value-added foam ceramics	(Li <i>et al.</i> , 2021)
Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints	(Galvão <i>et al.</i> , 2018)
Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick	(Freitas <i>et al.</i> , 2018)
Technical and environmental feasibility of interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams	(Filho <i>et al.</i> , 2017)
Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete	(Zhao; Fan; Sun, 2014)