v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ROTAS TECNOLÓGICAS PARA OBTENÇÃO DE SÍLICA DE ALTO TEOR A PARTIR DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA NARRATIVA

TECHNOLOGICAL ROUTES FOR OBTAINING HIGH-GRADE SILICA FROM IRON ORE TAILINGS: A NARRATIVE LITERATURE REVIEW

RUTAS TECNOLÓGICAS PARA LA OBTENCIÓN DE SÍLICE DE ALTO CONTENIDO A PARTIR DE RELAVES DE MINERAL DE HIERRO: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA NARRATIVA

Gabriel Mateus Oliveira Cubi[1], Guilherme José Oliveira Cubi[2]

e7119489
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9489

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Este artigo analisou as rotas tecnológicas empregadas na concentração e na purificação da fração quartzosa proveniente de rejeitos de minério de ferro. Foi realizada uma revisão bibliográfica narrativa, com abordagem descritiva e comparativa, abrangendo publicações de 2017 a 2026. Treze estudos experimentais foram comparados quanto à sequência operacional, posição dos tratamentos de ativação, sistema lixiviante, teor final de SiO_2, recuperação física e escala dos experimentos. As rotas exclusivamente físicas produziram materiais com até 97,42% de SiO_2, enquanto a incorporação da lixiviação permitiu alcançar teores superiores a 99,9% em seis estudos. A maior pureza, de 99,9978%, foi obtida por um processo intensivo com moagem fina, temperaturas elevadas, lixiviação em múltiplos estágios e utilização de ácido fluorídrico. Entretanto, rotas sem flúor alcançaram até 99,93% de SiO_2. O tratamento térmico anterior à separação magnética proporcionou recuperação física de 85,42% e produto com 99,819% de SiO_2, embora tenha sido avaliado em apenas um estudo. Não foi observada relação direta entre maior pureza e maior recuperação física. Conclui-se que a seleção da rota deve considerar a aplicação pretendida, a recuperação física da fração quartzosa, a complexidade operacional e os impactos associados ao consumo de energia e reagentes.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos de minério de ferro. Sílica. Quartzo. Separação magnética. Lixiviação.

ABSTRACT

This article analyzed the technological routes used to concentrate and purify the quartz fraction recovered from iron ore tailings. A narrative literature review with a descriptive and comparative approach was conducted, covering publications from 2017 to 2026. Thirteen experimental studies were compared according to their operational sequence, position of activation treatments, leaching system, final SiO_2 content, physical recovery, and experimental scale. Exclusively physical routes produced materials containing up to 97.42% SiO_2, whereas the addition of leaching resulted in contents above 99.9% in six studies. The highest purity, 99.9978%, was obtained through an intensive process involving fine grinding, elevated temperatures, multistage leaching, and hydrofluoric acid. However, fluorine-free routes achieved up to 99.93% SiO_2. Thermal treatment before magnetic separation resulted in 85.42% physical recovery and a product containing 99.819% SiO_2, although this configuration was evaluated in only one study. No direct relationship was observed between higher purity and higher physical recovery.

[1]Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas-MG, Brasil. Engenheiro de Minas e mestrando em Engenharia Química (PPGEQ).
[2]Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas-MG, Brasil. Engenheiro de Minas, mestre e doutor em Tecnologia Mineral.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

It was concluded that route selection should consider the intended application, physical recovery of the quartz fraction, operational complexity, and the impacts associated with energy and reagent consumption.

KEYWORDS: *Iron ore tailings. Silica. Quartz. Magnetic separation. Leaching.*

RESUMEN
Este artículo analizó las rutas tecnológicas empleadas para concentrar y purificar la fracción de cuarzo recuperada de relaves de mineral de hierro. Se realizó una revisión bibliográfica narrativa, con enfoque descriptivo y comparativo, que abarcó publicaciones de 2017 a 2026. Se compararon trece estudios experimentales según la secuencia operativa, la posición de los tratamientos de activación, el sistema de lixiviación, el contenido final de SiO_2, la recuperación física y la escala experimental. Las rutas exclusivamente físicas produjeron materiales con hasta un 97,42% de SiO_2, mientras que la incorporación de la lixiviación permitió superar el 99,9% en seis estudios. La mayor pureza, del 99,9978%, se obtuvo mediante un proceso intensivo con molienda fina, temperaturas elevadas, lixiviación en múltiples etapas y ácido fluorhídrico. Sin embargo, las rutas sin flúor alcanzaron hasta un 99,93% de SiO_2. El tratamiento térmico previo a la separación magnética proporcionó una recuperación física del 85,42% y un producto con un 99,819% de SiO_2, aunque esta configuración se evaluó en un solo estudio. No se observó una relación directa entre una mayor pureza y una mayor recuperación física. Se concluye que la selección de la ruta debe considerar la aplicación prevista, la recuperación física de la fracción de cuarzo, la complejidad operativa y los impactos asociados al consumo de energía y reactivos.

PALABRAS CLAVE*: Relaves de mineral de hierro. Sílice. Cuarzo. Separación magnética. Lixiviación.*

INTRODUÇÃO

Sob a perspectiva da economia circular, rejeitos com viabilidade técnica e econômica podem ser reinseridos nas cadeias produtivas como matérias-primas secundárias. Essa valorização pode reduzir o volume destinado às estruturas de disposição, diminuir a demanda por recursos minerais primários e possibilitar a obtenção de produtos com maior valor agregado. Entre os constituintes desses materiais, destaca-se o quartzo, que pode ocorrer acompanhado por hematita, magnetita, goethita, minerais aluminosos e outras fases acessórias. Pan *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2023) demonstram que rejeitos com teores expressivos de SiO_2 apresentam potencial para a produção de materiais destinados aos setores de vidro, cerâmica, refratários e cargas minerais ou, após purificação mais intensa, a aplicações tecnológicas de maior exigência.

O aproveitamento dessa fração quartzosa depende da remoção dos minerais ferríferos e das demais impurezas associadas ao quartzo. Liu *et al.* (2023) e Long *et al.* (2024a) explicam que elementos como Fe, Al, Ca, Mg, Ti, Na e K podem constituir fases minerais independentes, recobrir a superfície das partículas, ocorrer como inclusões ou estar incorporados à estrutura cristalina. Como essas formas de ocorrência apresentam comportamentos distintos, uma única

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

operação raramente é suficiente para produzir sílica de alto teor. As rotas podem combinar preparação granulométrica, separação magnética, flotação, moagem, tratamento térmico e lixiviação ácida. Nesta revisão, o termo ativação designa um tratamento que modifica previamente o material para favorecer uma operação posterior, enquanto a intensificação do processo corresponde ao emprego de energia ou de condições operacionais destinadas a acelerar a transferência de massa, a transferência de calor ou as reações envolvidas. Dependendo de sua posição e função no fluxograma, tratamentos térmicos, mecânicos, por micro-ondas ou por ultrassom podem desempenhar uma dessas funções.

Os estudos experimentais mostram que diferentes combinações dessas operações podem produzir materiais com teores superiores a 99% de SiO_2. Li *et al.* (2023a, 2023b, 2023c) demonstraram que a separação magnética supercondutora de alto gradiente pode ser combinada com diferentes sistemas de lixiviação, inclusive processos sem ácido fluorídrico (HF) e assistidos por ultrassom. Long *et al.* (2024b, 2025), por sua vez, alcançaram purezas próximas ou superiores a 4N, classificação correspondente a pelo menos 99,99% de SiO_2, mediante rotas com moagem fina, tratamento térmico e lixiviação em múltiplos estágios. O aumento da pureza pode estar associado a maior consumo energético, tempos prolongados, uso de reagentes perigosos e redução da recuperação física da fração quartzosa.

A posição do tratamento no fluxograma também pode influenciar o desempenho. Oliveira Cubi *et al.* (2026) aplicaram diretamente ao rejeito um pré-tratamento térmico por tostagem de curta duração, realizado por 10 minutos a 800 °C antes da separação magnética. O aquecimento explorou a diferença de expansão térmica entre quartzo e hematita para produzir microtrincas e favorecer a liberação mineral, beneficiando a concentração e a lixiviação posterior. Nesta revisão, essa configuração foi classificada como ativação anterior à concentração. Em outras rotas, os tratamentos são aplicados ao concentrado quartzoso ou simultaneamente à lixiviação. Essas diferenças indicam que a avaliação não deve se limitar ao teor final de SiO_2, mas considerar também a recuperação física da fração quartzosa, a posição e a duração do tratamento, o número de operações, o uso de HF e a possibilidade de escalonamento.

Apesar dos avanços, os estudos apresentam ampla heterogeneidade quanto à composição inicial, mineralogia, granulometria, sequência operacional e forma de apresentação dos resultados. Nem todos informam balanços de massa, recuperação global, consumo energético, quantidade de reagentes ou geração de efluentes. Permanece, portanto, a seguinte questão: como a sequência das operações, a presença e a posição dos tratamentos de ativação influenciam a pureza, a recuperação física da fração quartzosa e a complexidade das rotas empregadas no reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro? A revisão justifica-se pela

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

necessidade de organizar essas evidências e identificar alternativas capazes de conciliar qualidade do produto, aproveitamento mineral e menor severidade operacional.

Diante disso, o objetivo geral deste artigo é analisar as rotas tecnológicas reportadas para a concentração e a purificação da sílica proveniente de rejeitos de minério de ferro. Especificamente, busca-se classificar as rotas conforme a sequência e a posição das operações; comparar os teores inicial e final de SiO_2 e os valores disponíveis de recuperação física; analisar a influência da presença e da posição dos tratamentos de ativação e das técnicas de intensificação; e discutir limitações relacionadas aos reagentes, ao consumo energético, ao número de estágios e ao escalonamento dos processos.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Rejeitos de minério de ferro: geração e características

A Agência Nacional de Mineração (2021) define o estéril como o material removido durante a lavra e descartado antes do beneficiamento, enquanto o rejeito corresponde ao material descartado durante ou após o processamento mineral. Por ter sido submetido a operações de moagem, classificação, deslamagem, separação magnética ou flotação, o rejeito apresenta características determinadas tanto pelo minério de origem quanto pelo circuito que o gerou (Du *et al.*, 2026). Nos circuitos de flotação reversa do minério de ferro, parte do quartzo separado dos minerais ferríferos é direcionada ao rejeito. Por isso, algumas correntes apresentam elevado teor de sílica, embora ainda possam conter minerais de ferro não recuperados.

Carmignano *et al.* (2021) estimaram uma geração mundial de aproximadamente 1,4 bilhão de toneladas de rejeitos de minério de ferro por ano e demonstraram que esses materiais apresentam ampla variação granulométrica e química, com teores de SiO_2 entre 18% e 90%. Essa heterogeneidade também pode ocorrer dentro de um mesmo depósito. Souza *et al.* (2021) identificaram quartzo e hematita como fases predominantes em um rejeito de deslamagem, acompanhadas por goethita, gibbsita e caulinita, enquanto Carneiro *et al.* (2023) verificaram diferenças entre as frações arenosas, finas e lamosas, ressaltando a necessidade de amostragem representativa.

Assim, a definição de uma rota de reaproveitamento deve considerar a composição química, a mineralogia, a granulometria, o grau de liberação e a associação entre o quartzo e os contaminantes. Essa caracterização determina se a fração quartzosa pode ser aproveitada diretamente ou se exigirá etapas adicionais de concentração, ativação e purificação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.2. Potencial da fração quartzosa como fonte secundária de sílica

Embora sejam frequentemente utilizados como sinônimos, quartzo e sílica possuem significados distintos. Sílica é a denominação do dióxido de silício (SiO_2), que pode ocorrer em formas cristalinas ou amorfas, enquanto o quartzo corresponde ao seu principal polimorfo cristalino. Segundo Götze, Pan e Müller (2021), defeitos e substituições químicas em sua estrutura influenciam diretamente suas propriedades. Portanto, um rejeito com elevado teor de SiO_2 pode constituir uma fonte potencial de sílica, mas sua caracterização mineralógica é necessária para confirmar a predominância do quartzo. Como esses materiais já foram submetidos a operações de cominuição e concentração, podem apresentar granulometria favorável ao reprocessamento. Pan *et al.* (2022) e Long *et al.* (2024a) apontam os rejeitos silicosos como fontes alternativas para produtos quartzosos de maior valor agregado.

Entretanto, o teor global de SiO_2 não determina isoladamente a qualidade do material. As impurezas podem ocorrer como partículas minerais livres, recobrimentos superficiais, inclusões sólidas ou fluidas e elementos incorporados à estrutura cristalina. Xie *et al.* (2023) explicam que minerais liberados, como hematita, magnetita, goethita, feldspatos e argilominerais, podem ser removidos por concentração física ou lixiviação. Em contrapartida, inclusões submicrométricas e elementos estruturalmente incorporados podem exigir tratamentos térmicos, mecânicos ou químicos mais intensivos. A forma de ocorrência das impurezas pode, portanto, ser tão importante quanto sua concentração para a definição da rota de purificação.

Embora não exista uma classificação universal, Khan *et al.* (2025) classificam como 3N o material com pelo menos 99,9% de SiO_2; 4N, com 99,99%; 4N5, com 99,995%; e 4N8, com 99,998%. Contudo, Liu *et al.* (2025) ressaltam que essa classificação não substitui a verificação dos limites específicos de cada contaminante. Materiais de pureza intermediária podem atender aos setores de vidro, cerâmica, refratários e cargas minerais, enquanto produtos mais puros apresentam potencial para aplicações ópticas, fotovoltaicas e eletrônicas. Como a obtenção de purezas elevadas pode exigir mais operações, energia e reagentes, a valorização da fração quartzosa deve compatibilizar a qualidade requerida, a recuperação física da fração quartzosa e a complexidade do processo.

1.3. Operações de concentração e purificação da sílica

A obtenção de produtos ricos em sílica a partir de rejeitos de minério de ferro pode envolver operações físicas e químicas organizadas conforme as características do material de partida. As operações físicas promovem a liberação e a separação das fases minerais, enquanto os tratamentos químicos removem contaminantes residuais presentes na superfície, nas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

inclusões ou em regiões de difícil acesso. Du *et al.* (2026) destacam que a definição da rota deve considerar a composição química, a mineralogia, a granulometria e o grau de associação entre o quartzo e os minerais contaminantes.

1.3.1. Concentração física da fração quartzosa

A preparação granulométrica busca promover a liberação do quartzo associado aos minerais ferríferos. Entretanto, a moagem excessiva pode gerar ultrafinos, aumentar o consumo energético e favorecer o recobrimento superficial, a formação de agregados e o arraste durante a concentração. Após a liberação, a separação magnética é empregada para remover minerais portadores de ferro. A magnetita pode ser separada em campos de menor intensidade, enquanto hematita e goethita exigem campos mais elevados. Ge *et al.* (2017) e Lima *et al.* (2025) demonstram que o desempenho depende da intensidade do campo, da granulometria e do grau de liberação. Quando as fases ferríferas permanecem associadas ao quartzo ou ocorrem como inclusões, podem ser necessárias operações complementares.

A flotação também pode separar o quartzo dos minerais ferríferos e aluminosos com base nas diferenças entre as propriedades superficiais das partículas. Sua seletividade depende da mineralogia, do pH, dos reagentes, da qualidade da água e da presença de lamas. Operações como deslamagem, classificação hidráulica e separação gravítica podem auxiliar o processo, embora a remoção de frações muito finas possa provocar perdas de quartzo. Em geral, a concentração física produz um material com maior teor de SiO_2 e reduz a massa encaminhada à purificação química, mas não elimina completamente impurezas presentes como recobrimentos, inclusões ou substituições estruturais.

1.3.2. Purificação química por lixiviação

A lixiviação é empregada para dissolver contaminantes que permanecem após a concentração física. Ácidos clorídrico, sulfúrico, nítrico e fluorídrico podem remover compostos de ferro, alumínio, cálcio, magnésio e outros elementos. A eficiência depende da mineralogia das impurezas, da concentração do reagente, da temperatura, do tempo de contato, da relação sólido-líquido e da granulometria. Segundo Liu *et al.* (2025), o sistema químico deve ser selecionado conforme a composição do material e a qualidade requerida para o produto. Embora a combinação de ácidos e a repetição dos estágios possam elevar a pureza, essas condições também aumentam o consumo de reagentes, o tempo de processamento e a geração de efluentes (Long *et al.*, 2024b).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O ácido fluorídrico apresenta elevada capacidade de dissolução de silicatos e de regiões que contêm inclusões, mas envolve riscos operacionais, corrosão dos equipamentos, possibilidade de perda de sílica e necessidade de tratamento rigoroso dos efluentes. Por isso, têm sido desenvolvidos sistemas sem flúor, como a rota avaliada por Li *et al.* (2023c). Temperatura, agitação e técnicas de intensificação podem acelerar a remoção das impurezas, mas o aumento da severidade não garante a viabilidade do processo (Shao *et al.*, 2026). Assim, a lixiviação deve ser integrada à concentração física, buscando conciliar pureza, recuperação física, segurança e consumo de reagentes.

1.4. Tratamentos de ativação e técnicas de intensificação do processo

Neste estudo, ativação corresponde à aplicação de um tratamento capaz de modificar o material e facilitar uma operação posterior. O objetivo pode ser promover a liberação entre o quartzo e os contaminantes, formar fissuras, aumentar a área superficial ou tornar as impurezas mais acessíveis à separação e à lixiviação. A intensificação, por sua vez, envolve o fornecimento de energia ou a alteração das condições operacionais para acelerar as reações e a transferência de massa. Quando aplicada diretamente ao rejeito, a ativação pode beneficiar a concentração física; quando realizada sobre o concentrado quartzoso, reduz a massa submetida ao tratamento; e, quando ocorre durante a lixiviação, atua principalmente sobre a velocidade de remoção das impurezas.

O tratamento térmico pode produzir expansão diferencial, transformação de fases e microfissuras nas interfaces minerais. Long *et al.* (2024b) empregaram aquecimento combinado com moagem fina e lixiviação, enquanto Oliveira Cubi *et al.* (2026) aplicaram um pré-tratamento térmico de curta duração ao rejeito antes da separação magnética, favorecendo a liberação entre quartzo e hematita e as operações posteriores. O aquecimento por micro-ondas também pode gerar tensões interfaciais devido à absorção seletiva de energia pelas fases ferríferas, embora seu desempenho dependa da composição mineralógica e da distribuição dos minerais absorvedores (Chen *et al.*, 2024). A moagem pode exercer função semelhante ao aumentar a liberação, a área superficial e a reatividade do material, mas sua aplicação excessiva eleva o consumo energético e a produção de ultrafinos.

O ultrassom é empregado principalmente durante a lixiviação. A cavitação produz microjatos e ondas de choque que renovam a interface entre as partículas e a solução, favorecendo a transferência de massa e a remoção de películas superficiais. Li *et al.* (2023a) demonstraram que essa técnica pode intensificar a purificação sem flúor, embora sua aplicação industrial ainda dependa do consumo energético e da obtenção de cavitação uniforme em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

maiores volumes. Os mecanismos, as posições e as limitações dessas técnicas estão sintetizados na Tabela 1. A ativação, entretanto, não é obrigatória: sua inclusão deve ser justificada pelas características das impurezas e pelo aumento da pureza ou da recuperação física, considerando também a energia consumida, a segurança e a possibilidade de escalonamento.

Tabela 1. Mecanismos, posições e limitações dos tratamentos de ativação e das técnicas de intensificação empregados nas rotas de recuperação e purificação da sílica

Tratamento ou técnica	Mecanismo predominante	Posição possível na rota	Efeito esperado	Principais limitações
Tratamento térmico	Expansão diferencial, transformação mineralógica, tensões interfaciais e formação de microtrincas	Antes da concentração ou depois da concentração e antes da lixiviação	Aumento da liberação mineral e da acessibilidade das impurezas aos reagentes	Consumo energético, necessidade de controle da temperatura e possibilidade de transformações indesejadas
Ativação mecânica	Redução granulométrica, aumento da área superficial e geração de defeitos estruturais	Antes da concentração ou antes da lixiviação	Maior exposição das impurezas e aumento da reatividade do material	Produção de ultrafinos, contaminação pelos corpos moedores e elevado consumo energético
Tratamento por micro-ondas	Aquecimento seletivo das fases minerais e geração de gradientes térmicos	Antes da concentração ou antes da lixiviação	Formação rápida de microfissuras e enfraquecimento das interfaces minerais	Aquecimento heterogêneo, possibilidade de centelhamento, equipamentos específicos e dificuldades de escalonamento
Ultrassom	Cavitação, formação de microjatos, dispersão das partículas e renovação da interface sólido–líquido	Principalmente durante a lixiviação	Aumento da transferência de massa, aceleração da lixiviação e remoção de películas superficiais	Consumo energético, capacidade limitada e dificuldade de produzir cavitação uniforme em maiores escalas

Fonte: elaboração própria (2026), com base em Long *et al.* (2024b), Li *et al.* (2023a), Oliveira Cubi *et al.* (2026), Li, Zhao e Li (2026) e Shao *et al.* (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. METODOLOGIA

Esta revisão bibliográfica foi conduzida de forma narrativa, com abordagem descritiva e comparativa, visando analisar as rotas tecnológicas empregadas na concentração e na purificação da fração quartzosa proveniente de rejeitos de minério de ferro. O levantamento foi direcionado à identificação das operações utilizadas, da posição dos tratamentos de ativação no fluxograma e dos resultados obtidos em termos de teor final de SiO_2 e recuperação física da fração quartzosa. Por se tratar de uma revisão narrativa, a análise buscou sintetizar criticamente as configurações tecnológicas encontradas na literatura, sem pretensão de realizar metanálise ou classificação estatística das rotas.

2.1. Levantamento bibliográfico

Para a fundamentação teórica, foram consultados artigos científicos publicados entre janeiro de 2017 e 14 de outubro de 2026, localizados nas bases e plataformas ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Acadêmico. Também foram examinadas as listas de referências dos trabalhos selecionados e de revisões relacionadas ao processamento de quartzo, à purificação da sílica e ao reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro, com o objetivo de localizar estudos diretamente relacionados ao tema.

As buscas foram realizadas mediante combinações dos termos *iron ore tailings, silica recovery, silica purification, quartz, high-purity quartz, magnetic separation, acid leaching, thermal treatment, microwave e ultrasound*, além dos correspondentes em português “rejeito de minério de ferro”, “recuperação de sílica”, “purificação de sílica”, “quartzo”, “quartzo de alta pureza”, “separação magnética”, “lixiviação ácida”, “tratamento térmico”, “micro-ondas” e “ultrassom”. Entre as combinações empregadas estiveram *“iron ore tailings” AND (“silica” OR “quartz”) AND (“recovery” OR “purification”)* e *“iron ore tailings” AND “high-purity quartz”.*

As publicações de caráter conceitual e os artigos de revisão foram utilizados exclusivamente na fundamentação sobre geração de rejeitos, características do quartzo, natureza das impurezas e princípios das operações de processamento. O conjunto destinado à comparação das rotas foi constituído por 13 estudos experimentais publicados entre 2018 e 2026. Dessa forma, o número de referências utilizadas na fundamentação teórica é superior ao número de trabalhos que compõem a análise comparativa.

2.2. Critérios de seleção

Foram incluídos no conjunto comparativo artigos originais revisados por pares, disponíveis integralmente e que utilizaram rejeitos de minério de ferro, ou concentrados diretamente obtidos desses materiais, para recuperar ou purificar a fração quartzosa. Os estudos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

deveriam apresentar informações suficientes sobre a sequência das operações e pelo menos um resultado relacionado ao teor final de SiO_2, à remoção de impurezas ou à recuperação do produto, com indicação da etapa de referência quando disponível.

Foram excluídas publicações duplicadas, estudos sem descrição suficiente dos procedimentos, trabalhos baseados exclusivamente em outros tipos de minério ou resíduo e pesquisas direcionadas a aplicações dos rejeitos em concreto, cimento, cerâmica ou outros materiais de construção sem recuperação da fração quartzosa. Artigos de revisão, publicações conceituais e estudos sobre técnicas de processamento sem aplicação direta a rejeitos de minério de ferro foram empregados apenas na fundamentação teórica e não integraram a comparação dos resultados experimentais.

A seleção foi realizada inicialmente pela leitura dos títulos e resumos, seguida da avaliação dos textos completos considerados pertinentes. Após a aplicação dos critérios estabelecidos, 13 estudos experimentais foram mantidos na síntese comparativa. Como a busca possui caráter narrativo e direcionado, não foi realizada contabilização sistemática de todas as ocorrências recuperadas em cada plataforma. A quantidade de trabalhos utilizada em cada comparação variou conforme a disponibilidade e a possibilidade de verificação dos dados nas publicações originais.

2.3. Organização e análise das informações

As informações foram registradas em uma matriz bibliográfica contendo autoria, ano de publicação, características do material de partida, teor inicial de SiO_2, sequência das operações, tipo e posição do tratamento de ativação, método de concentração, sistema lixiviante, teor final de SiO_2, tipo e valor da recuperação, etapa de referência, escala experimental e limitações relatadas. A consulta aos estudos originais também permitiu verificar as condições às quais os resultados estavam associados e identificar diferenças entre os indicadores empregados pelos autores.

Quando um estudo apresentou diferentes condições experimentais, foram registrados o teor final de SiO_2 e o valor de recuperação referentes à mesma condição selecionada para a comparação. Não foram combinados o maior teor de pureza de um ensaio com o maior valor de recuperação obtido em outro. Resultados cuja origem, etapa de referência ou base de cálculo não pôde ser confirmada foram classificados como não informados ou insuficientemente verificáveis.

A recuperação física da etapa de concentração foi diferenciada da recuperação global da rota. A primeira corresponde ao indicador relacionado à recuperação física da fração

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

quartzosa durante a operação de concentração, enquanto a segunda considera o desempenho acumulado das diferentes operações desde a alimentação inicial até o produto purificado. Como os estudos utilizaram critérios e bases de cálculo distintos, somente foram comparados os valores cuja etapa de referência pôde ser identificada. Recuperações globais, recuperações específicas da lixiviação e valores de base ambígua não foram tratados como equivalentes à recuperação física da etapa de concentração.

2.4. Análise comparativa

As rotas foram classificadas em seis grupos: concentração exclusivamente física; concentração seguida de lixiviação sem ativação; ativação aplicada após a concentração e antes da lixiviação; ativação térmica realizada antes da concentração; lixiviação sem flúor assistida por ultrassom; e processos intensivos envolvendo moagem fina, tratamento térmico ou lixiviação em múltiplos estágios. A comparação considerou os teores inicial e final de SiO_2, a recuperação física da fração quartzosa, a posição dos tratamentos de ativação, o uso de ácido fluorídrico, a duração e a temperatura das operações, o número de estágios, a complexidade do fluxograma e a escala dos experimentos.

Os resultados foram interpretados de forma descritiva e no contexto de cada publicação, sem o estabelecimento de uma classificação absoluta das rotas. Os estudos utilizaram materiais com diferentes composições químicas, mineralogias, granulometrias e associações entre o quartzo e os minerais portadores de ferro. Também foram observadas diferenças nas intensidades de campo magnético, temperaturas, tempos de processamento, concentrações de reagentes, relações sólido–líquido, equipamentos e escalas experimentais. Além disso, os autores adotaram diferentes critérios para o cálculo e a apresentação da recuperação. Em razão dessa heterogeneidade, não foram realizados procedimentos de normalização dos resultados, metanálise ou comparação estatística direta; os valores de pureza e de recuperação física comparável não foram interpretados isoladamente como evidência de superioridade de determinada rota.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Perfil dos estudos selecionados

Foram selecionados 13 estudos experimentais publicados entre 2018 e 2026. Yang *et al.* (2018) correspondem ao trabalho mais antigo, enquanto os demais foram publicados a partir de 2023. Doze estudos avaliaram materiais provenientes da China, enquanto Oliveira Cubi *et al.* (2026) utilizaram um rejeito brasileiro. Essa concentração geográfica limita a generalização dos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

resultados, pois as características dos rejeitos dependem da origem geológica e do processo de beneficiamento.

Dez estudos foram desenvolvidos exclusivamente em escala laboratorial. Li *et al.* (2023c), Tang *et al.* (2025) e Li, Li e Zhao (2025) apresentaram avaliações em escala semi-industrial, piloto ou ampliada. A separação magnética de alto gradiente foi a principal técnica de concentração, geralmente combinada com lixiviação e, em determinadas rotas, moagem fina, tratamento térmico ou ultrassom.

Doze estudos informaram o teor final de SiO_2. Seis alcançaram pelo menos 99,9%, enquanto Long *et al.* (2024b) e Long *et al.* (2025) obtiveram valores iguais ou superiores a 99,99%. A recuperação física da etapa de concentração foi apresentada em nove trabalhos, porém com diferentes bases de cálculo. Informações sobre consumo energético, custos e geração de efluentes foram pouco frequentes.

3.2. Caracterização das rotas tecnológicas

A sequência das operações, a posição dos tratamentos, os sistemas lixiviantes e o desempenho dos estudos selecionados são apresentados na Tabela 2. As rotas variaram desde processos exclusivamente físicos até configurações intensivas destinadas à obtenção de quartzo com pureza 4N ou superior.

Yang *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2024) e Li, Li e Zhao (2025) avaliaram rotas exclusivamente físicas, baseadas principalmente na separação magnética supercondutora de alto gradiente. Essas configurações apresentaram menor número de operações e dispensaram a lixiviação, mas produziram materiais com pureza inferior à alcançada pelas rotas químicas. Ainda assim, podem atender a aplicações menos restritivas, como vidros, cerâmicas e areia industrial.

Li *et al.* (2023c) e Tang *et al.* (2025) combinaram a concentração magnética com lixiviação sem flúor. As rotas alcançaram elevados teores de SiO_2, embora tenham exigido períodos prolongados de lixiviação. Li *et al.* (2023b), Li *et al.* (2024a) e Li *et al.* (2024b), por sua vez, empregaram tratamentos de ativação após a concentração e antes da purificação química.

Oliveira Cubi *et al.* (2026) foram os únicos a aplicar a ativação térmica diretamente ao rejeito, antes da separação magnética, favorecendo tanto a concentração quanto a lixiviação posterior. Li *et al.* (2023a) e Li, Zhao e Li (2026) utilizaram ultrassom durante a lixiviação sem flúor. Já Long *et al.* (2024b) e Long *et al.* (2025) empregaram moagem fina, temperaturas elevadas e lixiviação em múltiplos estágios. Essas últimas rotas alcançaram as maiores purezas do conjunto analisado, mas também apresentaram maior complexidade operacional.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Características e desempenho das rotas analisadas

Autor/ano	SiO_2 inicial (%)	Rota tecnológica	Posição da ativação	Lixiviante	SiO_2 final (%)	Recuperação física (%)
Yang *et al.* (2018)	68,67	S-HGMS	Sem ativação	Não aplicado	92,57	NI
Li *et al.* (2023b)	71,2	S-HGMS → AT/moagem → LX	Após a concentração	HCl + HF	99,51	43,54
Li *et al.* (2023c)	81,39	S-HGMS → LX	Sem ativação	HNO_3 + HCl + H_2SO_4	99,92	60,59
Li *et al.* (2023a)	69,32	S-HGMS → US + LX em três estágios	Durante a lixiviação	HCl + $H_2C_2O_4$	99,93	45,24
Zhang *et al.* (2024)	NI	S-HGMS	Sem ativação	Não aplicado	NI	NI
Li *et al.* (2024b)	71,788	S-HGMS em dois estágios → AT → LX	Após a concentração	HCl + H_2SO_4 + HF	99,961	56,33
Li *et al.* (2024a)	61,905	S-HGMS → AT → LX	Após a concentração	HCl + H_2SO_4 + HNO_3	99,938	53,03
Long *et al.* (2024b)	78,72	WHIMS → MF → LX em dois estágios → TT	Após a concentração	HCl + H_3PO_4 + HF	99,99	NI†
Tang *et al.* (2025)	NI	S-HGMS → LX	Sem ativação	HCl + H_2SO_4	99,48	40,42
Long *et al.* (2025)	95,45*	WHIMS → MF → LX em dois estágios → alta temperatura	Após a concentração	Mistura ácida com HF	99,9978	NI
Li, Li e Zhao (2025)	76,32	S-HGMS *rougher–cleaner* com dispersante	Sem ativação térmica ou química	Não aplicado	97,42	54,81
Oliveira Cubi *et al.* (2026)	77,338	Tostagem curta → SM → LX	Antes da concentração	HCl + H_2SO_4 + HNO_3	99,819	85,42

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Autor/ano	SiO_2 inicial (%)	Rota tecnológica	Posição da ativação	Lixiviante	SiO_2 final (%)	Recuperação física (%)
Li, Zhao e Li (2026)	97,42*	Concentrado de S-HGMS → LX assistida por US	Durante a lixiviação	HCl + $H_2C_2O_4$	99,59	NI

Legenda: S-HGMS – separação magnética supercondutora de alto gradiente; WHIMS – separação magnética úmida de alta intensidade; NI – não informado ou com base não identificada. A recuperação refere-se à concentração física, não à rota global. * Alimentação previamente concentrada. † Valor não comparável por divergência ou indefinição da base de cálculo. AT – ativação térmica; MF – moagem fina; LX – lixiviação; TT – tratamento térmico; SM – separação magnética; US – ultrassom.
Fonte: elaboração própria (2026).

3.3. Relação entre a rota tecnológica e o teor final de SiO_2

Os dados da Tabela 2 demonstram que as rotas exclusivamente físicas produziram os menores teores finais de SiO_2. Yang *et al.* (2018) elevaram o teor de 68,67% para 92,57%, enquanto Li, Li e Zhao (2025) obtiveram um produto com 97,42%. A concentração magnética pode, portanto, produzir materiais adequados a aplicações menos exigentes, mas apresenta limitações para a obtenção de sílica de alta pureza.

A incorporação da lixiviação elevou a pureza mesmo sem tratamentos adicionais de ativação. Li *et al.* (2023c) alcançaram 99,92% de SiO_2 utilizando separação magnética seguida de lixiviação sem flúor, enquanto Tang *et al.* (2025) obtiveram 99,48%. Esses resultados mostram que a ativação não é indispensável quando as impurezas permanecem acessíveis após a concentração física.

Nas rotas com tratamentos complementares, os teores finais variaram de 99,51% a 99,961%. Li *et al.* (2023a) alcançaram 99,93% com lixiviação sem flúor assistida por ultrassom. Oliveira Cubi *et al.* (2026) obtiveram 99,819% após aplicar tratamento térmico antes da separação magnética, empregando aquecimento de curta duração, sem HF ou moagem adicional.

Os maiores teores foram obtidos por Long *et al.* (2024b) e Long *et al.* (2025), com 99,99% e 99,9978% de SiO_2, respectivamente. Entretanto, essas rotas envolveram moagem fina, temperaturas elevadas, lixiviação em múltiplos estágios e uso de HF em parte do processo. Assim, a maior pureza esteve associada ao aumento da severidade operacional, embora rotas menos complexas também tenham alcançado valores superiores a 99,9%.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.4. Relação entre pureza e recuperação física

A relação entre o teor final de SiO_2 e a recuperação física na etapa de concentração foi analisada com base nos dados da Tabela 2. Foram considerados somente os estudos cuja base de cálculo pôde ser identificada. Os valores de Long *et al.* (2024b) não foram incluídos nessa comparação devido à divergência entre as recuperações reportadas.

Oliveira Cubi *et al.* (2026) apresentaram a maior recuperação física do conjunto analisado, com 85,42%, associada a um produto contendo 99,819% de SiO_2. Li *et al.* (2023c) alcançaram 99,92% de SiO_2 com recuperação física de 60,59%, enquanto Li *et al.* (2024a) e Li *et al.* (2024b) obtiveram purezas superiores a 99,93% e recuperações físicas entre 53,03% e 56,33%.

Li *et al.* (2023a), Li *et al.* (2023b) e Tang *et al.* (2025) alcançaram teores finais entre 99,48% e 99,93%, mas apresentaram recuperações físicas entre 40,42% e 45,24%. Por sua vez, Li, Li e Zhao (2025) obtiveram recuperação física de 54,81% e teor de 97,42% utilizando somente concentração física.

Não foi observada relação direta entre maior pureza e maior recuperação física. A pureza depende principalmente das etapas finais de purificação, enquanto a recuperação física está associada à seletividade da concentração física. Portanto, materiais com teores finais semelhantes podem resultar de perdas de sílica consideravelmente diferentes.

3.5. Influência da posição dos tratamentos de ativação

As posições dos tratamentos, sintetizadas na Tabela 1, produziram efeitos distintos nas operações posteriores. A ativação antes da concentração física foi avaliada somente por Oliveira Cubi *et al.* (2026). O tratamento térmico aplicado diretamente ao rejeito favoreceu a liberação entre quartzo e hematita, proporcionando recuperação física de 85,42% na separação magnética e produto final com 99,819% de SiO_2, sem moagem adicional ou utilização de HF.

Quando realizada após a concentração magnética, a ativação atuou principalmente como preparação para a lixiviação. Li *et al.* (2023b), Li *et al.* (2024a) e Li *et al.* (2024b) alcançaram teores finais entre 99,51% e 99,961%. Essa posição reduz a massa submetida ao tratamento, mas não influencia a recuperação física anteriormente obtida na etapa de concentração.

Li *et al.* (2023a) e Li, Zhao e Li (2026) aplicaram ultrassom simultaneamente à lixiviação. O primeiro estudo alcançou 99,93% de SiO_2 após três estágios sem flúor, enquanto o segundo elevou o teor do concentrado de 97,42% para 99,59%. Entretanto, os estudos não apresentaram recuperação global nem comprovação do desempenho em maior escala.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A ativação não foi indispensável para alcançar elevada pureza, pois Li *et al.* (2023c) e Tang *et al.* (2025) obtiveram, respectivamente, 99,92% e 99,48% de SiO_2 sem essa etapa. Portanto, seu benefício depende da associação entre o quartzo e as impurezas. A ativação anterior à concentração mostrou-se promissora por beneficiar mais de uma operação, mas essa configuração foi avaliada em apenas um estudo e ainda requer validação com outros rejeitos e em escalas maiores.

3.6. Complexidade operacional, reagentes e escalonamento

A Tabela 3 sintetiza as vantagens e as limitações das categorias analisadas. As rotas variaram desde uma única etapa de separação magnética até processos que combinaram concentração, moagem fina, tratamento térmico e lixiviação em múltiplos estágios. Em geral, o aumento da pureza foi acompanhado pelo crescimento da complexidade operacional.

Tabela 3. Síntese do desempenho, das vantagens e das limitações das categorias de rotas analisadas

Categoria da rota	Estudos (n)	SiO_2 final (%)	Recuperação física disponível (%)	Principal vantagem	Principal limitação
Concentração exclusivamente física	3	92,57–97,42	54,81[1]	Menor número de operações e ausência de lixiviação	Pureza limitada para aplicações exigentes
Concentração seguida de lixiviação sem ativação	2	99,48–99,92	40,42–60,59	Elevada pureza sem tratamento adicional	Tempos prolongados de lixiviação
Ativação após a concentração	3	99,51–99,961	43,54–56,33	Maior exposição das impurezas antes da lixiviação	Consumo energético e mais operações
Ativação antes da concentração	1	99,819	85,42	Benefício para a separação e a lixiviação	Evidência disponível em apenas um estudo
Lixiviação assistida por ultrassom	2	99,59–99,93	45,24[1]	Intensificação da lixiviação sem HF	Escalonamento e consumo energético pouco avaliados

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Categoria da rota	Estudos (n)	SiO_2 final (%)	Recuperação física disponível (%)	Principal vantagem	Principal limitação
Processos intensivos em múltiplos estágios	2	99,99–99,9978	Não comparável	Obtenção de pureza 4N ou superior	HF, temperaturas elevadas e alta complexidade

Legenda: [1]Apenas um estudo da categoria apresentou recuperação física comparável.
Fonte: elaboração própria (2026).

Entre os dez estudos que utilizaram lixiviação, quatro empregaram HF em pelo menos uma etapa. Li *et al.* (2023b), Li *et al.* (2024b), Long *et al.* (2024b) e Long *et al.* (2025) utilizaram esse reagente em rotas destinadas à obtenção de sílica de alto teor. Embora eficiente, o HF aumenta os requisitos de segurança, a corrosão dos equipamentos e a necessidade de tratamento dos efluentes.

As seis rotas sem flúor utilizaram principalmente HCl, H_2SO_4, HNO_3 ou ácido oxálico e alcançaram teores entre 99,48% e 99,93% de SiO_2. Entretanto, a ausência de HF não elimina os impactos ambientais, pois algumas configurações exigiram concentrações elevadas de ácidos, longos tempos de contato ou repetição da lixiviação.

Os dados energéticos foram limitados. Li, Li e Zhao (2025) informaram consumo específico de 1,8 kWh/t na separação magnética em escala ampliada, mas a maioria dos estudos não apresentou indicadores para moagem, aquecimento, ultrassom ou lixiviação. Long *et al.* (2024b) e Long *et al.* (2025) empregaram as condições mais severas, incluindo múltiplos estágios e temperaturas de até 250 °C.

A predominância de ensaios laboratoriais impede conclusões sobre custos, estabilidade operacional e geração contínua de efluentes. Assim, processos intensivos somente se justificam quando a aplicação exige pureza elevada e o valor do produto compensa o maior consumo de energia e reagentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura analisada confirma a viabilidade técnica da recuperação da fração quartzosa de rejeitos de minério de ferro. As rotas exclusivamente físicas alcançaram até 97,42% de SiO_2, enquanto a incorporação da lixiviação permitiu superar 99,9% em seis estudos. A maior pureza identificada, de 99,9978%, foi obtida por uma rota intensiva envolvendo moagem fina, temperaturas elevadas, múltiplos estágios e utilização de HF. Entretanto, processos sem flúor

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

alcançaram até 99,93%, demonstrando que esse reagente não é indispensável para todas as matérias-primas.

A posição da ativação influenciou sua função no processo. Quando aplicada após a concentração, favoreceu principalmente a lixiviação. O tratamento térmico anterior à separação magnética apresentou potencial para melhorar a liberação, a recuperação física e a purificação posterior, mas essa configuração foi avaliada em apenas um estudo. O ultrassom também intensificou a lixiviação sem flúor, embora seu consumo energético e escalonamento permaneçam pouco avaliados. Como não foi observada relação direta entre maior pureza e maior recuperação física, a seleção da rota deve considerar a aplicação pretendida, o aproveitamento da sílica, o consumo de reagentes e energia, a geração de efluentes e a complexidade operacional.

A predominância de estudos laboratoriais, a concentração das pesquisas na China e a ausência de balanços de massa completos limitam a comparação. Estudos futuros devem incluir ensaios piloto contínuos, rejeitos de diferentes origens e avaliações energéticas, econômicas e ambientais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Resolução ANM nº 85, de 2 de dezembro de 2021. Dispõe sobre procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéreis. Brasília, DF: ANM, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/resolucao-da-anm-ganha-selo-de-qualidade-regulatoria-do-ministerio-da-economia/resolucao-anm-no-85-02-12-2021.pdf/view. Acesso em: 14 out. 2026.

CARMIGNANO, O. *et al.* Iron ore tailings: characterization and applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 10, p. 1895-1911, 2021. DOI: https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100.

CARNEIRO, J. J. V. *et al.* Characterization of an iron ore tailing sample and the evaluation of its representativeness. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 41, n. 5, p. 2833-2852, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-023-02430-8.

CHEN, J. *et al.* Microwave treatment of minerals and ores: heating behaviors, applications, and future directions. **Minerals**, v. 14, n. 3, art. 219, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/min14030219.

DU, X. *et al.* Towards sustainable mining: a comprehensive review of resource recovery from iron ore tailings. **Minerals Engineering**, v. 244, art. 110309, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2026.110309.

GE, W.; ENCINAS, A.; ARAUJO, E.; SONG, S. Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): a review. **Results in Physics**, v. 7, p. 4278-4286, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.10.055.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

GÖTZE, J.; PAN, Y.; MÜLLER, A. Mineralogy and mineral chemistry of quartz: a review. **Mineralogical Magazine**, v. 85, n. 5, p. 639-664, 2021. DOI: https://doi.org/10.1180/mgm.2021.72.

KHAN, I.; YANG, X.; XIA, M.; HOU, Z. Analyzing petrographic characteristics and trace element distribution of high-purity quartz deposits from the Peshawar Basin, Pakistan: insights into processing and purification techniques. **European Journal of Mineralogy**, v. 37, n. 2, p. 151-167, 2025. DOI: https://doi.org/10.5194/ejm-37-151-2025.

LI, C. *et al.* Hematite tailings to high-purity silica: mechanistic studies and life cycle assessment analysis. **Chemosphere**, v. 365, art. 143335, 2024a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143335.

LI, C. *et al.* Preparation of high-purity SiO_2 by S-HGMS coupled with mixed-acid leaching: a case study on hematite tailings from Ansteel, China. **Waste Management**, v. 174, p. 240-250, 2024b. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.026.

LI, Y. *et al.* Eco-friendly strategy for preparation of high-purity silica from high-silica IOTs using S-HGMS coupling with ultrasound-assisted fluorine-free acid leaching technology. **Journal of Environmental Management**, v. 339, art. 117932, 2023a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117932.

LI, Y. *et al.* Recovery and preparation of high-grade silica from iron ore tailings by S-HGMS coupling with acid leaching technology: description of separation mechanism and leaching kinetics. **Powder Technology**, v. 424, art. 118523, 2023b. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118523.

LI, Y. *et al.* Separation and purification of high-purity quartz from high-silicon iron ore tailing: an innovative strategy for comprehensive utilization of tailings resources. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 169, p. 142-148, 2023c. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.006.

LI, Y.; LI, S.; ZHAO, Z. Controlling magnetic agglomeration in superconducting high gradient magnetic separation processing of iron ore tailings for high-grade silica recovery. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 35, n. 9, p. 1627-1644, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.08.006.

LI, Y.; ZHAO, Z.; LI, S. Ultrasonic-enhanced purification of silica powder from iron ore tailings and preparation of high-grade silica with high value added: reaction optimization, kinetic analysis, and mechanism insights. **Minerals Engineering**, v. 244, art. 110287, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2026.110287.

LIMA, N. P.; LOPES, G.; RESENDE, L.; FAUSTINO, L. High grade quartz products from magnetic separation and flotation of iron ore tailings. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 22, art. e3157, 2025. DOI: https://doi.org/10.4322/2176-1523.20253157.

LIU, C. *et al.* A review on removal of iron impurities from quartz mineral. **Minerals**, v. 13, n. 9, art. 1128, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/min13091128.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

LIU, M. *et al.* Advances in purification technologies and applications of high-purity quartz resources. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 35, n. 1, p. 51-64, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2024.11.008.

LONG, H. *et al.* Advanced processing techniques and impurity management for high-purity quartz in diverse industrial applications. **Minerals**, v. 14, n. 6, art. 571, 2024a. DOI: https://doi.org/10.3390/min14060571.

LONG, H. *et al.* Innovative process for the extraction of 99.99% high-purity quartz from high-silicon iron ore tailings. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 31, p. 2094-2102, 2024b. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.212.

LONG, H. *et al.* Utilization of high-silicon iron ore tailings for 4N8 high-purity quartz powder production via two-stage acid leaching. **Inorganic Chemistry**, v. 64, n. 8, p. 3805-3823, 2025. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.4c04882.

OLIVEIRA CUBI, G. M.; REIS, V. C. dos; LOPES, M. S.; OLIVEIRA CUBI, G. J. Valorization of iron ore tailings for high-grade silica sand production through roasting pretreatment followed by magnetic separation and acid leaching. **Minerals Engineering**, v. 241, art. 110179, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2026.110179.

PAN, X. *et al.* Resource, characteristic, purification and application of quartz: a review. **Minerals Engineering**, v. 183, art. 107600, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107600.

SHAO, H. *et al.* Review of advanced purification technologies for high-purity quartz materials. **Materials Research Bulletin**, v. 196, art. 113904, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113904.

SOUZA, A. H. D.; KRÜGER, F. L. V.; ARAÚJO, F. G. S.; MENDES, J. J. Mineralogical characterization applied to iron ore tailings from the desliming stage with emphasis on quantitative electron microscopy (QEM). **Materials Research**, v. 24, art. e20190677, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0677.

TANG, X. *et al.* Study on purification of SiO_2 by S-HGMS coupling technology with fluorine-free from iron ore tailings and mechanism. **JOM**, v. 77, n. 4, p. 2323-2343, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11837-025-07168-7.

XIE, Y.; LI, S.; PAN, X.; LI, Y.; ZHANG, A. Recent advances in the marketing, impurity characterization and purification of quartz. **Minerals and Mineral Materials**, v. 2, art. 16, 2023. DOI: https://doi.org/10.20517/mmm.2023.17.

YANG, C. *et al.* Application of superconducting high gradient magnetic separation technology on silica extraction from iron ore beneficiation tailings. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 39, n. 1, p. 44-49, 2018. DOI: https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1324439.

ZHANG, A. *et al.* Resource utilization of iron ore tailings to recover SiO_2 sand through S-HGMS: parametric optimization and mechanism analysis. **JOM**, v. 76, n. 5, p. 2392-2402, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11837-024-06447-z.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ZHANG, R. *et al.* Research status and challenges of high-purity quartz processing technology from a mineralogical perspective in China. **Minerals**, v. 13, n. 12, art. 1505, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/min13121505.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.