**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLOGICA DE MINAS GERAIS**
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

EYSHILA SAMARA ANDRADE FREITAS

# CONCENTRAÇÃO DE SÍLICA A PARTIR DE RESÍDUO ARENOSO DE MINÉRIO DE FERRO POR LIXIVIAÇÃO ÁCIDA: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO E DO EFEITO DA CALCINAÇÃO

BELO HORIZONTE
2026

EYSHILA SAMARA ANDRADE FREITAS

# CONCENTRAÇÃO DE SÍLICA A PARTIR DE RESÍDUO ARENOSO DE MINÉRIO DE FERRO POR LIXIVIAÇÃO ÁCIDA: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO E DO EFEITO DA CALCINAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE
2026

Freitas, Eyshila Samara Andrade.
F866c Concentração de sílica a partir de resíduo arenoso de minério de ferro por lixiviação ácida : avaliação dos parâmetros de processo e do efeito da calcinação / Eyshila Samara Andrade Freitas. – 2026.
76 f. : il.
Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.

1. Resíduos. 2. Lixiviação. 3. Sílica - Purificação. 4. Calcinação (Metalurgia). I. Paiva, Paulo Renato Perdigão de. II. Título.
CDD: 662.7

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB6-2660

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**
**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**
**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS**

**FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 1 / 2026 - CEMAT (11.51.06)**

**Nº do Protocolo: 23062.033050/2026-91**

**Belo Horizonte-MG, 25 de junho de 2026.**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

## Defesa Final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 1º/2026

Aos **15 dias do mês de junho de 2026**, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, a aluna **Eyshila Samara Andrade Freitas**, matrícula 20203017241, apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Concentração de Sílica a partir de Resíduo Arenoso de Minério de Ferro por Lixiviação Ácida: Avaliação dos Parâmetros de Processo e do Efeito da Calcinação*, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, o qual foi **APROVADO** pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª Dr.ª Mayra Aparecida Nascimento
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Me. Rômulo Pereira Xavier
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

***(Assinado digitalmente em 29/06/2026 09:55 )***
MAYRA APARECIDA NASCIMENTO
*PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO*
*CEMAT (11.51.06)*
*Matrícula: 3255019*

***(Assinado digitalmente em 26/06/2026 12:07 )***
PAULO RENATO PERDIGÃO DE PAIVA
*SUBCOORDENADOR - SUBSTITUTO*
*CEMAT (11.51.06)*
*Matrícula: 2112363*

***(Assinado digitalmente em 29/06/2026 18:04 )***
ROMULO PEREIRA XAVIER
*TECNICO DE LABORATORIO AREA*
*DEMAT (11.55.06)*
*Matrícula: 1243781*

Visualize o documento original em **https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp** informando seu número: **1**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **25/06/2026** e o código de verificação: **cf467072bc**

## AGRADECIMENTOS

Durante toda a minha graduação, muitas pessoas contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. Tenho um carinho enorme por essa instituição, onde vivi experiências que levarei para toda a vida. Foi aqui que conheci amigos incríveis, o meu namorado e professores que me inspiraram não só como profissionais, mas também como pessoas. Em especial, gostaria de agradecer a minha mãe por sempre me apoiar. Agradeço também ao meu orientador, Paulo Renato Perdigão Paiva, que é, sem dúvidas, uma das minhas maiores referências: um profissional excepcional, íntegro e, acima de tudo, uma pessoa admirável. Obrigada, Paulo, por topar embarcar comigo nessa "loucura" que é o TCC e por tornar essa etapa, que não é fácil, muito mais leve e até divertida. Também deixo aqui meu agradecimento a todos os professores, servidores e colegas que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada e contribuíram para a minha formação, não só no TCC, mas ao longo de toda a graduação. E, claro, um agradecimento mais que especial à Gabriela Sampaio, minha parceira de TCC nos sábados. Obrigada por dividir comigo esse processo, pelos momentos de desespero, risadas e por não me deixar surtar sozinha. Sou muito grata a todos vocês por fazerem parte dessa história.

## RESUMO

O minério de ferro é um dos principais recursos minerais do Brasil, e seu beneficiamento gera expressivos volumes de resíduos arenosos ricos em sílica, cujo reaproveitamento representa uma alternativa sustentável alinhada aos princípios da economia circular. Este trabalho avaliou a purificação de sílica a partir do resíduo arenoso do Complexo Metamórfico Bação por meio de lixiviação ácida, investigando a influência do tipo de agente lixiviante, do tempo de reação e da calcinação prévia a 800 °C sobre a eficiência de remoção de impurezas. A caracterização do resíduo por fluorescência e difração de raios X revelou uma matriz predominantemente quartzosa contendo impurezas associadas à hematita e à microclina. Na lixiviação com ácido nítrico ($HNO_3$), o tempo de 60 minutos apresentou o melhor desempenho, promovendo reduções de 58,7% de $Fe_2O_3$, 22,8% de $Al_2O_3$ e 18,9% de $K_2O$. Para a mistura ácida composta por HCl, $H_2SO_4$ e $HNO_3$, o tempo de 30 minutos apresentou o melhor desempenho, alcançando remoção de 58,7% de $Fe_2O_3$, porém com menor eficiência na remoção das demais impurezas quando comparado ao sistema nítrico. O pré-tratamento térmico a 800 °C mostrou-se prejudicial em ambos os sistemas, reduzindo a remoção de $Fe_2O_3$ de 58,7% para 28,1% no sistema nítrico e de 58,7% para 3,8% na mistura ácida, este último resultado atribuído à formação de gel de sílica passivante induzido pelo $H_2SO_4$. Ademais, avaliou-se o efeito da calcinação a 1200 °C sobre o produto da lixiviação, verificando-se que o tratamento térmico promoveu desidroxilação superficial, reorganização estrutural e redução expressiva da área superficial específica, resultando em material de maior estabilidade química e térmica. Conclui-se que a lixiviação direta por 60 minutos com $HNO_3$, sem pré-tratamento térmico, constitui a rota mais eficiente para o enriquecimento de sílica a partir do resíduo arenoso de minério de ferro, por promover remoção mais equilibrada das impurezas e utilizar um sistema lixiviante menos agressivo que a mistura ácida.



**Palavras-chave:** Resíduo arenoso. Lixiviação ácida. Purificação de sílica. Calcinação.

## ABSTRACT

Iron ore is one of Brazil's main mineral resources, and its beneficiation generates significant volumes of silica-rich sandy tailings, whose reuse represents a sustainable alternative aligned with the principles of the circular economy. This study evaluated the purification of silica from sandy tailings of the Bação Metamorphic Complex through acid leaching, investigating the influence of the leaching agent, reaction time, and prior calcination at 800 °C on impurity removal efficiency. Characterization of the tailings by X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD) revealed a predominantly quartz-rich matrix containing impurities associated with hematite and microcline. In nitric acid ($HNO_3$) leaching, a reaction time of 60 minutes provided the best performance, promoting reductions of 58.7% in $Fe_2O_3$, 22.8% in $Al_2O_3$, and 18.9% in $K_2O$. For the acid mixture composed of HCl, $H_2SO_4$, and $HNO_3$, the 30-minute treatment exhibited the best performance, achieving 58.7% $Fe_2O_3$ removal, although with lower efficiency in removing the remaining impurities when compared with the nitric acid system. Prior calcination at 800 °C proved detrimental in both systems, reducing $Fe_2O_3$ removal from 58.7% to 28.1% in the nitric acid system and from 58.7% to 3.8% in the acid mixture, the latter being attributed to the formation of a passivating silica gel induced by $H_2SO_4$. In addition, the effect of calcination at 1200 °C on the leached product was evaluated. The thermal treatment promoted surface dehydroxylation, structural reorganization, and a significant reduction in specific surface area, resulting in a material with greater chemical and thermal stability. It was concluded that direct leaching with $HNO_3$ for 60 minutes, without prior thermal treatment, represents the most efficient route for silica enrichment from iron ore sandy tailings, due to its more balanced impurity removal and the use of a less aggressive leaching system than the acid mixture.



**Keywords:** Sandy tailings. Acid leaching. Silica purification. Calcination.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dados estatístico sobre o setor mineral 14
Figura 2 - Região do quadrilátero ferrífero 15
Figura 3 - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro 16
Figura 4 - Classificação dos resíduos de minério de ferro 18
Figura 5 - Barragem na configuração alteamento a montante 20
Figura 6 - Transformações polimórficas da sílica em função da temperatura 24
Figura 7 - Desenho esquemático da química da superfície da sílica 25
Figura 8 - Desenho esquemático do princípio da lixiviação acida 27
Figura 9 - Mecanismo de liberação de impurezas por tratamento térmico 33
Figura 10 - Fluxograma geral do processo experimental 34
Figura 11 - Resíduo arenoso de minério de ferro do complexo metamórfico bação 35
Figura 12 - Esquema do processo de lixiviação ácida 38
Figura 13 - Desenho esquemático do preparo da solução ácida 39
Figura 14 - Distribuição granulométrica do resíduo em estudo 40
Figura 15 - Análise química do resíduo em estudo 41
Figura 16 - Composição mineralógica do resíduo como recebido 43
Figura 17 - Amostras de resíduo após o processo de lixiviação com ácido nítrico 44
Figura 18 - Redução de impurezas após o processo de lixiviação com ácido nítrico 45
Figura 19 - Amostras de resíduo após o processo de lixiviação com mistura ácida 48
Figura 20 - Redução de impurezas após o processo de lixiviação com mistura ácida 49
Figura 21 - Comparativo da redução de impurezas dos agentes lixiviantes analisados 51
Figura 22 - Percentual de enriquecimento de sílica após o processo de lixiviação 54
Figura 23 - Composição mineralógica das amostras 60.N e 30.M 55
Figura 24 - Efeito do pré-tratamento térmico na remoção de impurezas por lixiviação em ácido nítrico 57
Figura 25 - Efeito do pré-tratamento térmico na remoção de impurezas por lixiviação em mistura ácida 60
Figura 26 - Influência da calcinação na composição química das amostras lixiviadas 63
Figura 27 - Influência da calcinação na composição mineralógica das amostras lixiviadas 64
Figura 28 - Espectros de FTIR da amostra lixiviada com ácido nítrico antes e após a calcinação 66

Figura 29 - Espectros de FTIR da amostra lixiviada com mistura ácida antes e após a calcinação 67
Figura 30 - Influência da calcinação na área superficial das amostras lixiviadas 68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais agentes lixiviantes e seus mecanismos gerais 28
Tabela 2 - Efeito dos principais parâmetros operacionais na lixiviação 30

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO 11**
**2 OBJETIVOS 13**
**2.1 Objetivo Geral 13**
**2.2 Objetivos Específicos 13**
**3 REVISÃO DE LITERATURA 14**
**3.1 Minério de Ferro 14**
*3.1.1 Panorama econômico 14*
*3.1.2 Etapas de beneficiamento 16*
**3.2 Resíduos de Minério de Ferro 18**
*3.2.1 Geração e classificação dos resíduos 18*
*3.2.2 Impactos ambientais e disposição em barragens 19*
*3.2.3 Reaproveitamento e valorização tecnológica dos resíduos de minério de ferro 21*
*3.2.4 Complexo metamórfico bação 22*
**3.3 Sílica 23**
*3.3.1 Estrutura, propriedades e química superficial 23*
*3.3.2 Pureza da sílica e influência das impurezas metálicas 25*
**3.4 Lixiviação Ácida 26**
*3.4.1 Fundamentos da lixiviação ácida 26*
*3.4.2 Agentes lixiviantes e mecanismos de dissolução 28*
*3.4.3 Variáveis operacionais e cinética do processo 29*
**3.5 Tratamento Térmico 31**
**4 MATERIAIS E MÉTODOS 34**
**4.1 Descrição Geral do Trabalho 34**
**4.2 Materiais 35**
**4.3 Métodos 36**
*4.3.1 Caracterização do resíduo e da sílica obtida 36*
*4.3.2 Processamento do material 37*
*4.3.3 Etapas de separação, secagem, calcinação 39*
**5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 40**
**5.1 Caracterização do Resíduo 40**
**5.2 Processo de Lixiviação Ácida 43**
*5.2.1 Efeito do tempo de lixiviação utilizando ácido nítrico: resíduo in natura 43*

*5.2.2 Efeito do tempo de lixiviação utilizando mistura ácida: resíduo in natura 47*
*5.2.3 Comparação entre os agentes lixiviantes: resíduo in natura 50*
*5.2.4 Efeito do pré tratamento térmico do resíduo na lixiviação 56*
**5.3 Calcinação 62**
**6 CONCLUSÕES 71**
**7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 72**
**REFERÊNCIAS 73**

# 1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha papel fundamental na economia brasileira, sendo essencial para o fornecimento de matérias-primas às indústrias e ao comércio global. Em 2024, o valor da produção mineral brasileira alcançou aproximadamente R$ 298,8 bilhões, com o minério de ferro representando cerca de 52,6% desse total. Esse cenário evidencia a relevância econômica do setor, especialmente nos estados de Minas Gerais e Pará, onde se concentram importantes reservas minerais e grandes operações de mineração (IBRAM, 2025).

Entretanto, o elevado volume de produção mineral também resulta na geração expressiva de resíduos durante as etapas de extração e beneficiamento do minério de ferro. Nesses processos, parte significativa do material processado não é convertida em produto final, sendo destinada como resíduo de mineração. Estima-se que esses materiais possam representar até 40% do total processado, alcançando dezenas de milhões de toneladas anuais. Esses resíduos são compostos principalmente por partículas finas contendo óxidos e hidróxidos de ferro, além de minerais como a sílica, geralmente presente na forma de quartzo (Carmignano *et al.*, 2021).

O armazenamento desses materiais em barragens impõe desafios técnicos, ambientais e regulatórios cada vez mais rigorosos, especialmente após a promulgação da Lei Federal nº 14.066/2020, que proibiu o método de alteamento a montante e estabeleceu diretrizes para a descaracterização dessas estruturas no Brasil (Brasil, 2020). Nesse contexto, intensifica-se a busca por alternativas voltadas ao reaproveitamento desses materiais, alinhadas aos princípios da economia circular e da mineração sustentável. A recuperação de minerais de interesse econômico presentes nesses resíduos constitui uma estratégia relevante para a redução de impactos ambientais e para a ampliação do aproveitamento dos recursos já extraídos, agregando valor a materiais anteriormente destinados apenas à disposição final (Carmignano *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2020; Cubi *et al.*, 2026).

Nesse contexto de valorização de materiais e reaproveitamento de recursos minerais, cabe destacar que a terminologia adotada pela indústria mineral e pela literatura técnica frequentemente utiliza o termo "rejeito" para designar os materiais remanescentes do beneficiamento mineral. Entretanto, neste trabalho será empregado preferencialmente o termo "resíduo". Essa escolha fundamenta-se na proposta de valorização e reaproveitamento do material estudado, em consonância com os princípios da economia circular e da mineração sustentável. Dessa forma, por se tratar de um material com potencial de aproveitamento tecnológico para obtenção de sílica de maior pureza, o termo "resíduo" será utilizado ao longo deste trabalho para se referir ao material investigado.

Dentre os constituintes de maior interesse tecnológico presentes nesses resíduos, destaca-se a sílica ($SiO_2$), um dos compostos mais abundantes da crosta terrestre (Deer; Howie; Zussman, 2013). A sílica possui ampla aplicação industrial, com destaque para setores tecnológicos como a indústria eletrônica e fotovoltaica (USGS, 2025). Nos últimos anos, esse material tem assumido importância estratégica devido à crescente demanda por silício metálico e polisilício, obtidos a partir da redução da sílica, empregados na fabricação de células solares, semicondutores e dispositivos eletrônicos.

Apesar desse potencial, a sílica presente em resíduos minerais geralmente contém impurezas que limitam sua aplicação em setores tecnológicos mais exigentes. Elementos como ferro, alumínio, cálcio e magnésio estão entre os principais contaminantes, tornando necessária a aplicação de processos de purificação capazes de elevar o teor de $SiO_2$ e reduzir tais impurezas (Long *et al.*, 2024).

Entre as técnicas mais empregadas para esse fim, destaca-se a lixiviação ácida, processo hidrometalúrgico que promove a dissolução de impurezas por meio da ação de agentes químicos ácidos (Iler, 1979; Long *et al.*, 2024). Estudos recentes indicam que a combinação entre separação magnética, tratamentos térmicos e lixiviação ácida pode resultar em sílica com pureza superior a 99%, ampliando seu potencial de aplicação em setores de maior valor agregado, como as indústrias eletrônica, química e fotovoltaica (Cubi *et al.*, 2026; Qu *et al.*, 2024).

Entretanto, apesar de eficientes, os processos convencionais de purificação ainda apresentam limitações ambientais, operacionais e econômicas. Em muitos casos, são necessários múltiplos ciclos de lixiviação com elevadas concentrações de ácidos fortes, além de tratamentos térmicos em altas temperaturas e longos tempos de processamento. Essas condições aumentam o consumo energético, elevam os custos operacionais e intensificam a geração de efluentes ácidos, tornando o processo mais complexo e ambientalmente impactante (Carmignano *et al.*, 2021; Cubi *et al.*, 2026).

Diante desse cenário, torna-se necessária a busca por rotas mais eficientes e sustentáveis para a purificação da sílica proveniente de resíduos minerais. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da purificação de sílica ($SiO_2$) a partir de resíduo arenoso de minério de ferro por meio de uma rota alternativa de lixiviação ácida. Para isso, foram investigados parâmetros como o tipo de agente lixiviante, o tempo de lixiviação e a influência do pré-tratamento térmico na eficiência do processo, bem como os efeitos do tratamento térmico sobre a qualidade final da sílica obtida.

# 2 OBJETIVOS

## 2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa propôs-se a desenvolver uma rota alternativa de lixiviação ácida para a extração e purificação da sílica presente em resíduos arenosos provenientes da mineração de ferro, previamente submetidos às etapas de cominuição, deslamagem e separação magnética.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física, química e mineralogicamente o resíduo arenoso de minério de ferro, previamente submetido às etapas de cominuição, deslamagem e separação magnética, com ênfase na identificação das fases minerais portadoras de sílica e das principais impurezas associadas;
- Desenvolver um rota de lixiviação ácida para aumentar a concentração da sílica presente no resíduo;
- Avaliar a influência dos parâmetros do processo de lixiviação ácida, especialmente o tempo de reação e o tipo de agente lixiviante, na eficiência de remoção de impurezas e na pureza final da sílica obtida;
- Investigar o efeito da calcinação prévia do resíduo sobre a reatividade do material e sobre a eficiência da remoção de contaminantes durante a lixiviação ácida;
- Analisar a influência da calcinação na microestrutura e nas propriedades da sílica obtida após o processo de purificação;
- Comparar a eficiência das rotas com e sem a etapa de calcinação, considerando principalmente a pureza química e as características estruturais da sílica obtida.

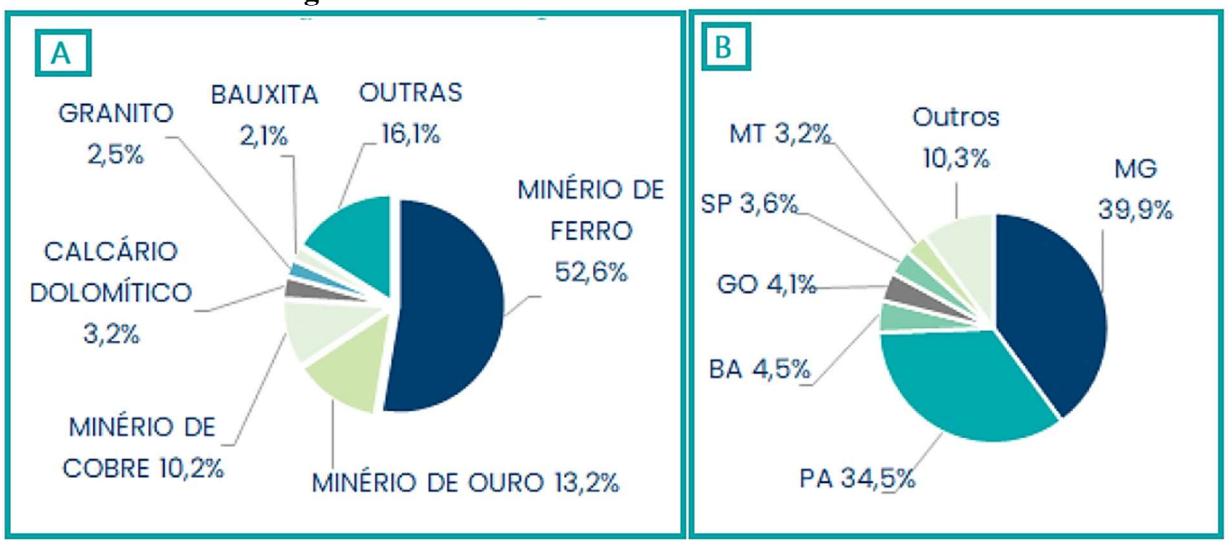
# 3 REVISÃO DE LITERATURA

## 3.1 Minério de Ferro

### *3.1.1 Panorama econômico*

O minério de ferro desempenha papel fundamental na industrialização global, por ser a principal matéria-prima para a produção de aço e um dos pilares da economia mundial. Nesse contexto, o Brasil consolida-se como um dos maiores produtores dessa *commodity*, com o setor mineral alcançando um faturamento de R$ 298,8 bilhões em 2025, dos quais 52,6% correspondem ao minério de ferro. No âmbito nacional, o estado de Minas Gerais destaca-se ao concentrar cerca de 40% do faturamento mineral do país, conforme apresentado na Figura 1 (IBRAM, 2025).

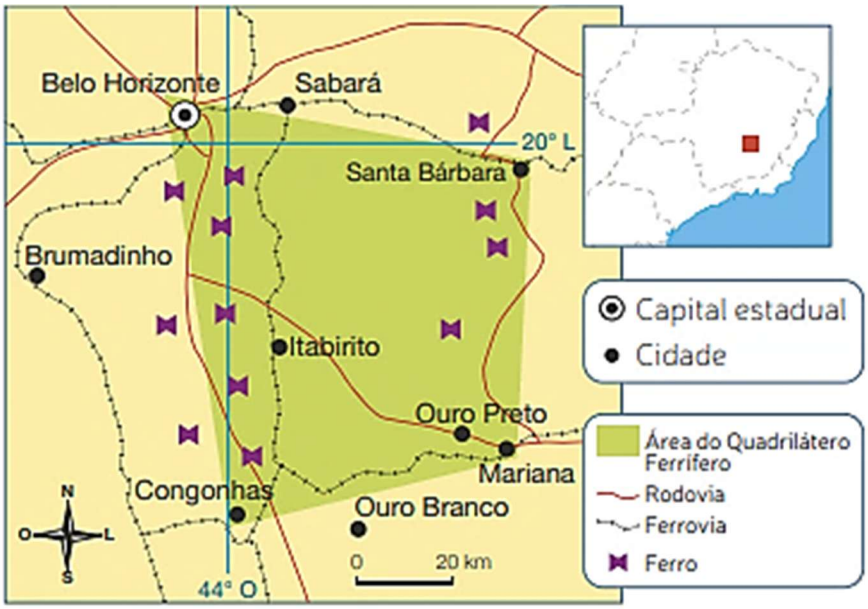
**Figura 1 - Dados estatístico sobre o setor mineral**




A) Participação por substância B) Participação por estado.
Fonte: IBRAM (2025).

A relevância de Minas Gerais na extração de minério de ferro está ligada, principalmente, à região conhecida como Quadrilátero Ferrífero (Figura 2). Tal área se destaca como a principal zona de mineração do Brasil e responde por uma considerável parcela das vendas de minério de ferro para outros países (IBRAM, 2025).

**Figura 2 - Região do quadrilátero ferrífero**




Fonte: IBRAM (2025).

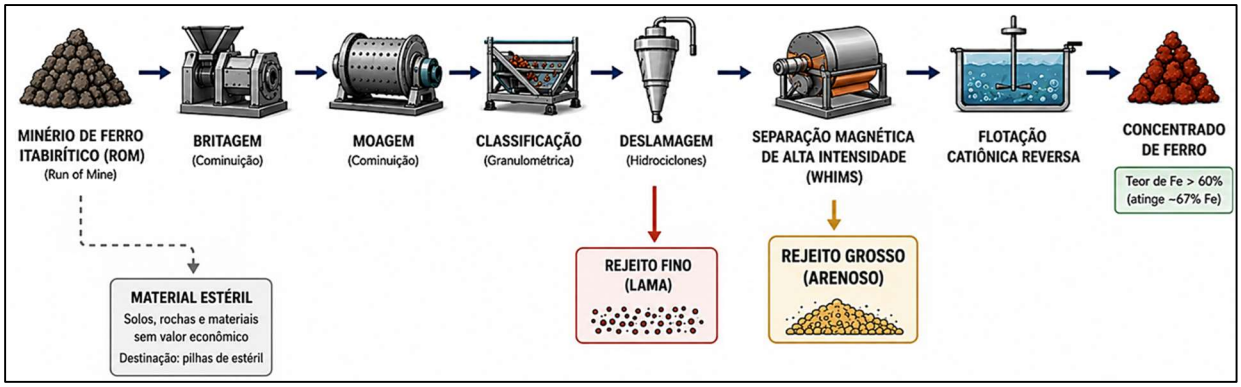
A importância do Quadrilátero Ferrífero não se deve somente à grande quantidade de reservas existentes, mas principalmente à qualidade da composição mineralógica dos depósitos, formados essencialmente por itabiritos e minerais ricos em hematita. Diferentemente das reservas do Pará, compostas predominantemente por hematitas de alto teor, frequentemente superiores a 60% de ferro, os depósitos mineiros são majoritariamente constituídos por itabiritos, com teores médios próximos de 50% Fe, demandando etapas mais complexas de beneficiamento mineral. Mineralogicamente, essas formações são compostas principalmente por hematita ($\alpha$-$Fe_2O_3$), além de magnetita ($Fe_3O_4$) e goethita ($\alpha$-FeOOH), minerais diretamente associados à geração de resíduos durante o processamento (Larizzatti *et al.*, 2014).

Com a gradual exaustão dos depósitos de alto teor, a mineração de ferro passou a demandar o processamento de minérios cada vez mais pobres e complexos, especialmente itabiritos, que requerem etapas adicionais de beneficiamento para atingir os teores comerciais exigidos. Como consequência, ocorre um aumento expressivo na geração de resíduos minerais. No Brasil, a produção bruta de minério de ferro (ROM) alcançou 523 milhões de toneladas em 2024, sendo estimado que entre 20% e 40% desse volume seja convertido em resíduos durante o processamento. Minas Gerais, responsável por aproximadamente 57% da produção nacional beneficiada, concentra parcela significativa desse passivo mineral, evidenciando a crescente necessidade de desenvolvimento de estratégias para reaproveitamento e valorização desses materiais (IBRAM, 2025; ANM, 2025; Cubi *et al.*, 2026).

### *3.1.2 Etapas de beneficiamento*

Para realizar a comercialização do minério de ferro, esse material precisa passar por várias fases de tratamento mineral, nas quais o tamanho das partículas é ajustado e o material é concentrado. Cada uma dessas fases leva à produção de diferentes tipos de resíduos, que mudam de acordo com o método utilizado. A Figura 3 apresenta um fluxograma esquemático do processo de beneficiamento comumente empregado no setor mineral, conforme abordado por Souza *et al.* (2020).

**Figura 3 - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro**




Fonte: Gerado por ChatGPT modelo GPT-5.5 (2026).

O procedimento ilustrado na Figura 3 inicia-se com o minério de ferro itabirítico proveniente diretamente da lavra, denominado ROM (*Run of Mine*), o qual é submetido inicialmente às etapas de britagem e moagem. Essas operações de cominuição têm como principal objetivo promover a redução granulométrica do material e intensificar a separação entre os minerais de ferro e os minerais de ganga, favorecendo a eficiência das etapas subsequentes de concentração mineral (Carmignano *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2020).

Após a moagem, o minério segue para a etapa de classificação, responsável pela separação das partículas de acordo com sua granulometria, direcionando adequadamente o material para os processos posteriores de deslamagem e concentração. Durante a extração mineral e nas primeiras etapas do beneficiamento ocorre também a geração do denominado material estéril, constituído por solos, rochas encaixantes e materiais sem valor econômico imediato, normalmente destinados às pilhas de estéril (Souza *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2006).

Na sequência, o minério é direcionado à etapa de deslamagem, geralmente realizada em hidrociclones, cujo objetivo consiste na remoção das partículas ultrafinas e frações argilosas presentes na polpa mineral. O material removido no overflow corresponde ao chamado resíduo

fino ou lama, caracterizado por uma composição mineralógica complexa, formada predominantemente por minerais de ganga e óxidos de ferro residuais. Nesse contexto, destacam-se como principais minerais de ganga o quartzo ($SiO_2$), os argilominerais como a caulinita ($Si_2Al_2O_5(OH)_4$) e a gibbsita ($Al(OH)_3$), os feldspatos potássicos como a microclina ($KAlSi_3O_8$), além de micas (muscovita e biotita) e carbonatos em menores proporções, os quais contribuem para a presença de sílica, alumina e outros contaminantes no sistema. Mesmo sendo considerado resíduo, esse material ainda apresenta teores significativos de ferro, frequentemente próximos de 32%, evidenciando perdas metálicas associadas às limitações dos processos físicos convencionais de separação (Carmignano *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2020).

Posteriormente, o minério deslamado é submetido às etapas de concentração, responsáveis pelo aumento do teor de ferro a partir das diferenças nas propriedades físicas e físico-químicas dos minerais presentes. Entre os métodos mais empregados destaca-se a separação magnética de alta intensidade (WHIMS – *Wet High-Intensity Magnetic Separation*), utilizada para recuperar minerais com susceptibilidade magnética, como hematita e magnetita, promovendo sua separação em relação à ganga silicatada (Carmignano *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2020).

Complementarmente, a flotação catiônica reversa constitui a principal rota tecnológica aplicada aos itabiritos brasileiros, especialmente no Quadrilátero Ferrífero. Nesse processo, reagentes coletores promovem a hidrofobização do quartzo, permitindo sua remoção pela espuma, enquanto os minerais de ferro permanecem na polpa mineralizada. Como consequência dessa etapa ocorre a geração do denominado resíduo arenoso ou resíduo grosso, constituído majoritariamente por quartzo, frequentemente com teores superiores a 80% de sílica, e granulometria média superior a 100 μm (Cubi *et al.*, 2026; Xie *et al.*, 2023).

Ao final do beneficiamento, obtém-se o concentrado de minério de ferro, com teores que podem ultrapassar 60% e atingir aproximadamente 67% ferro, adequados à produção de *sinter feed* e *pellet feed* (Cubi *et al.*, 2026).

Entretanto, a eficiência do processo de concentração mineral, embora essencial para a obtenção de concentrados de ferro de alta qualidade, acarreta a geração expressiva de resíduos, os quais representam um dos principais desafios ambientais e econômicos da atividade mineradora (Souza *et al.,* 2020; Carmignano *et al.*, 2021).

## 3.2 Resíduos de Minério de Ferro

### *3.2.1 Geração e classificação dos resíduos*

A geração de resíduos na mineração de ferro está diretamente associada à complexidade mineralógica dos depósitos explorados e à necessidade de sucessivas etapas de beneficiamento para obtenção de concentrados com elevados teores de ferro. Com o esgotamento gradual das reservas de alto teor, especialmente aquelas constituídas predominantemente por hematita rica, tornou-se necessário o processamento de minérios mais pobres e complexos, como os itabiritos, intensificando significativamente a geração de resíduos (Carmignano *et al.,* 2021).

Nesse contexto, estima-se que sejam gerados aproximadamente 1,4 bilhão de toneladas anuais de resíduos de minério de ferro em escala global, concentrados principalmente em países como Austrália, Brasil e China. No cenário brasileiro, a geração de resíduos corresponde entre 20% e 40% da massa total do minério extraído, evidenciando a magnitude ambiental associada ao setor mineral (IBRAM, 2024).

Os resíduos gerados na mineração de ferro podem ser classificados, segundo Souza *et al.* (2020) e IBRAM (2024), de acordo com sua origem, granulometria, classificação ambiental e porte produtivo anual das unidades mineradoras, conforme apresentado na Figura 4.

**Figura 4 - Classificação dos resíduos de minério de ferro**




Fonte: Gerado por ChatGPT modelo GPT-5.5 (2026).

Quanto à origem no processo produtivo, os materiais gerados na mineração de ferro podem ser classificados em material estéril e resíduo. O material estéril corresponde ao solo e às rochas removidos durante a etapa de lavra para possibilitar a extração do minério, enquanto os resíduos consistem nos materiais remanescentes do beneficiamento mineral após a extração

da fração economicamente aproveitável do minério (Silva *et al*., 2006; Carmignano *et al*., 2021).

Do ponto de vista granulométrico, os resíduos podem ser subdivididos em resíduos finos (lama) e resíduos grossos ou arenosos, diferenciando-se principalmente pela granulometria, teor de umidade, composição mineralógica e etapa de beneficiamento em que são gerados. Os resíduos finos apresentam partículas predominantemente inferiores a 74 µm, enquanto os resíduos grossos ou arenosos possuem granulometria normalmente entre 40 e150 µm (Carmignano *et al*., 2021; Souza *et al*., 2020).

Além disso, os resíduos da mineração podem ser classificados conforme critérios ambientais estabelecidos pela ABNT NBR 10004 em resíduos perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II), sendo estes últimos subdivididos em não inertes (Classe II A) e inertes (Classe II B). Estudos indicam que os resíduos de minério de ferro são predominantemente classificados como resíduos não perigosos pertencentes à Classe II (Carmignano *et al.,* 2021).

As operações mineradoras também podem ser categorizadas administrativamente conforme o porte produtivo anual definido pela Agência Nacional de Mineração (ANM), sendo classificadas em pequeno, médio e grande porte. Operações de grande porte apresentam produção superior a 1.000.000 t/ano, enquanto unidades de médio porte produzem entre 100.000 e 1.000.000 t/ano. Já operações de pequeno porte apresentam produção entre 10.000 e 100.000 t/ano. Esses critérios também são utilizados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) para caracterizar o setor mineral brasileiro (ANM, 2024; IBRAM, 2024).

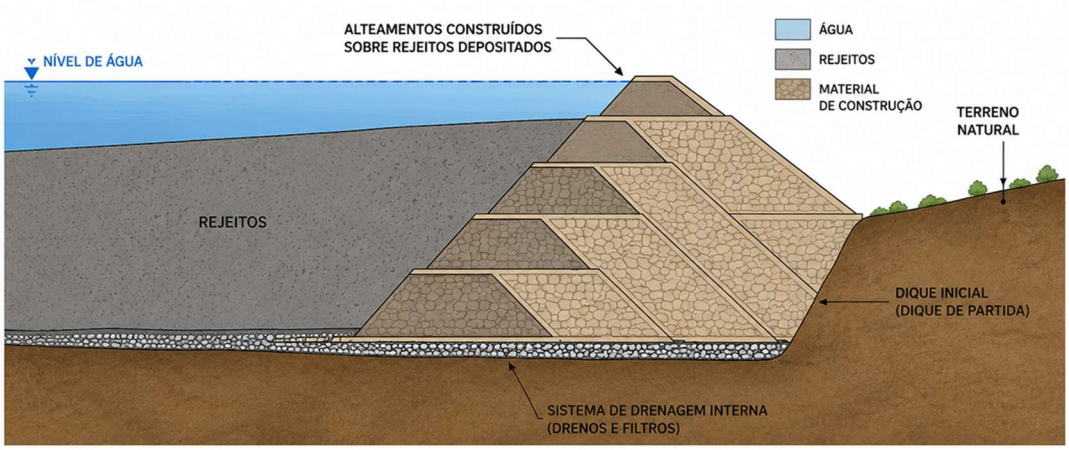
As propriedades granulométricas e químicas desses resíduos tornam sua gestão um desafio crescente, sobretudo em razão dos riscos ambientais associados à disposição em barragens e do aumento contínuo dos estoques gerados pela mineração (Carmignano *et al.*, 2021; Bragagnolo *et al.,* 2025).

### *3.2.2 Impactos ambientais e disposição em barragens*

Historicamente, cerca de 95% dos resíduos gerados pela mineração no Brasil foram destinados a barragens de contenção, totalizando centenas de estruturas distribuídas pelo país, com elevada concentração no estado de Minas Gerais. Entre os métodos construtivos empregados, destacou-se o alteamento a montante, amplamente utilizado devido ao menor custo operacional, porém associado a maiores riscos geotécnicos, especialmente relacionados ao fenômeno de liquefação dos resíduos saturados (Carmignano *et al.*, 2021; Bragagnolo *et al.*, 2025).

O alteamento a montante (Figura 5) é um método construtivo de barragens de resíduos no qual as sucessivas elevações da barragem são realizadas sobre o próprio resíduo previamente depositado. Nesse sistema, a estrutura é elevada progressivamente em direção à área de armazenamento dos resíduos, utilizando parte do material já disposto como base para as novas etapas construtivas (Carmignano *et al.*, 2021; Bragagnolo *et al.,* 2025).

**Figura 5 - Barragem na configuração alteamento a montante**




Fonte: Gerado por ChatGPT modelo GPT-5.5 (2026).

Os riscos associados a esse modelo de disposição tornaram-se evidentes após os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e de Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019). O desastre de Mariana liberou aproximadamente 43 milhões de m³ de resíduos, provocando impactos ambientais severos ao longo da bacia do Rio Doce até o Oceano Atlântico, enquanto o rompimento em Brumadinho resultou em centenas de vítimas fatais e extensa degradação ambiental (Carmo *et al.,* 2017; Carmignano *et al.*, 2021). Esses eventos impulsionaram mudanças significativas na legislação brasileira, culminando na promulgação da Lei Federal nº 14.066/2020, que proibiu novos alteamentos a montante e estabeleceu prazos para a descaracterização dessas estruturas (Brasil, 2020).

Além dos riscos estruturais associados às barragens, a disposição contínua de resíduos pode provocar impactos ambientais relacionados à contaminação de corpos hídricos, alteração da paisagem, supressão vegetal e ocupação de extensas áreas destinadas ao armazenamento desses materiais (Carmo *et al.,* 2017; Carmignano *et al.*, 2021).

Diante dos riscos estruturais e socioambientais evidenciados por falhas históricas em barragens de rejeitos, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias de reaproveitamento e valorização tecnológica que reduzam os volumes destinados à disposição final e convertam

esses materiais em insumos de valor econômico, alinhando a atividade minerária aos princípios da sustentabilidade e da economia circular (Carmo *et al.,* 2017).

### *3.2.3 Reaproveitamento e valorização tecnológica dos resíduos de minério de ferro*

Diante da necessidade de reduzir os volumes destinados à disposição final em barragens, os resíduos de mineração passaram gradualmente a ser avaliados não apenas como passivos ambientais, mas também como materiais com potencial de reaproveitamento e recuperação de valor econômico. Nesse contexto, conforme defendido por Carmignano *et al* (2021), conceitos relacionados à economia circular e à mineração sustentável passaram a estimular o desenvolvimento de rotas voltadas à reutilização desses materiais em diferentes aplicações industriais.

Entre as principais alternativas de valorização tecnológica, Carmignano *et al* (2021) destacam a aplicação dos resíduos de minério de ferro na construção civil, especialmente como substitutos parciais de agregados naturais em concretos, argamassas, pavimentação e materiais cerâmicos. A pesquisa revisada por esses autores demonstra que substituições de até 30% do agregado miúdo podem promover o refinamento da microestrutura e melhorias na resistência mecânica dos compósitos cimentícios.

Na indústria cerâmica, os estudos conduzidos por Silva *et al.* (2014) apontam que incorporações de até 40% de resíduo em revestimentos e pisos apresentaram ganhos em dureza superficial e resistência ao desgaste. Além disso, Mendes *et al.* (2019) produziram tijolos com aproximadamente 29% de resíduo que atenderam aos requisitos internacionais de resistência mecânica, alcançando valores próximos de 4,3 MPa.

A fração fina dos resíduos também apresenta potencial para a produção de materiais cimentícios sustentáveis e geopolímeros. Pesquisas específicas de do Carmo *et al.* (2014) indicam que esses materiais podem atingir resistências à compressão superiores a 100 MPa e resistência à flexão próxima de 20 MPa, evidenciando um elevado potencial para aplicações estruturais e pavimentação de alto desempenho. Segundo os mesmos autores, a presença de aluminossilicatos e óxidos de ferro contribui para o desenvolvimento de matrizes geopoliméricas com elevada estabilidade química e mecânica.

Entre as rotas de maior valor agregado, destaca-se o aproveitamento da fração arenosa rica em quartzo para a obtenção de sílica de alta pureza (*High Purity Quartz* – HPQ). O trabalho desenvolvido por Cubi *et al.* (2026) e a revisão de Long *et al.* (2024) reforçam que esse material possui ampla aplicação em setores de ponta, incluindo as indústrias fotovoltaica,

microeletrônica, fibras ópticas e semicondutores. Dependendo da aplicação, esses pesquisadores ressaltam que são requeridas purezas superiores a 99,9% (grau 3N), com rigoroso controle de contaminantes para não comprometer as propriedades ópticas, elétricas e térmicas dos dispositivos finais.

Entre as rotas de reaproveitamento de maior valor agregado, destaca-se o aproveitamento da fração arenosa rica em quartzo proveniente do Complexo Metamórfico Bação, uma vez que suas características geológicas e mineralógicas favorecem a concentração e purificação da sílica, possibilitando a obtenção de materiais com elevado grau de pureza para aplicações tecnológicas avançadas (Cubi *et al.,* 2026; Long *et al.*, 2024).

### *3.2.4 Complexo metamórfico bação*

O material investigado neste trabalho é proveniente do Complexo Metamórfico Bação (CMB), localizado na porção sul do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A caracterização geológica e mineralógica dessa unidade é relevante por controlar diretamente a composição dos resíduos minerais gerados durante o beneficiamento e, consequentemente, seu potencial de reprocessamento para obtenção de sílica de maior pureza.

Do ponto de vista geológico, o CMB é constituído por rochas cristalinas (granitos, gnaisses e migmatitos) que foram intensamente alteradas por processos de intemperismo ao longo do tempo, resultando na formação de espessos perfis de regolito e saprolito. Esses materiais são compostos predominantemente por quartzo, além de minerais secundários como caulinita, gibbsita e óxidos de ferro, característicos de ambientes de intensa alteração química no Quadrilátero Ferrífero (Figueiredo *et al.*, 2002). Também ocorrem minerais primários relictos parcialmente preservados, com destaque para microclina e plagioclásios pseudomorfizados, cuja alteração influencia a geoquímica local e o comportamento do material durante o processamento mineral (Figueiredo *et al.*, 2002).

As fases dominantes nos resíduos gerados durante o beneficiamento desse material são quartzo, hematita e magnetita, sendo a goethita também observada em proporções que podem atingir até 13,7% da massa (Pires *et al.*, 2019). Em termos de composição química, os resíduos brutos apresentam teores de $SiO_2$ entre 48% e 60% e aproximadamente 25% de ferro total, distribuído entre as diferentes fases de óxidos e hidróxidos mencionadas (Long *et al.*, 2025; Cubi *et al.*, 2026). Do ponto de vista físico, o material apresenta diâmetro médio ($d_{50}$) entre 25 e 80 µm e densidade de partículas superior a 3,7 g/cm³, refletindo a elevada presença de minerais de ferro. Além dessas características mineralógicas, químicas e físicas, o material

apresenta baixa capacidade de retenção de água e pH alcalino, comportamento associado às etapas de beneficiamento, especialmente à utilização de hidróxido de sódio (NaOH) durante a flotação reversa (Silva *et al.*, 2016; Pires *et al.*, 2019).

A presença simultânea de quartzo em elevada proporção e de impurezas metálicas, principalmente ferro sob a forma de óxidos e hidróxidos, confere a esse resíduo um perfil mineralógico favorável à purificação por lixiviação ácida. Enquanto o quartzo apresenta elevada estabilidade química em meio ácido diluído, as fases ferrosas apresentam maior reatividade, o que favorece sua dissolução seletiva. Entretanto, a forma de ocorrência dessas impurezas, seja como partículas discretas ou como inclusões nos grãos de quartzo, influencia diretamente a acessibilidade dos reagentes e, consequentemente, a eficiência do processo de purificação (Long *et al.*, 2025; Cubi *et al.*, 2026). Nesse contexto, torna-se fundamental investigar a influência de variáveis operacionais, como o tipo de agente lixiviante e o tempo de reação, uma vez que esses parâmetros controlam a cinética de dissolução das impurezas metálicas e afetam diretamente a eficiência da purificação, a seletividade do processo e a obtenção de concentrados de sílica com maior grau de pureza.

Uma vez que o resíduo dessa unidade geológica é majoritariamente quartzoso, torna-se necessário compreender profundamente a estrutura, as propriedades e a química superficial da sílica para viabilizar sua purificação (Figueiredo *et al.*, 2002; Iler, 1979).

## 3.3 Sílica

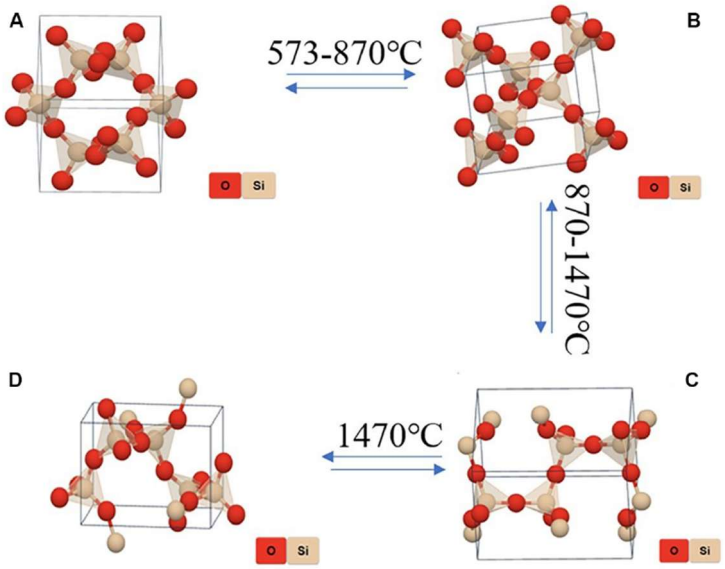
### *3.3.1 Estrutura, propriedades e química superficial*

A sílica ($SiO_2$) é um dos compostos mais abundantes da crosta terrestre, sendo formada pela combinação de silício e oxigênio em uma unidade tetraedrica [$SiO_4$]. Nesse arranjo, um átomo de silício ocupa o centro do tetraedro, coordenado a quatro átomos de oxigênio. A forma como esses tetraedros se conectam dá origem a diferentes estruturas cristalinas, conhecidas como polimorfos da sílica (Iler, 1979).

O quartzo α constitui a fase termodinamicamente estável da sílica em condições ambientes de temperatura e pressão. Ao ser aquecida, a sílica apresenta importantes transformações estruturais. Em torno de 573 °C, tem-se a transição reversível do quartzo α para o quartzo β, processo caracterizado por uma expansão anisotrópica da rede cristalina, capaz de gerar tensões internas no material. Em temperaturas mais elevadas, outras fases cristalinas passam a ser estáveis, como a tridimita, acima de aproximadamente 870 °C, e a cristobalita, em

temperaturas superiores a 1470 °C até a fusão. Apesar de serem normalmente encontradas em altas temperaturas, essas fases podem existir em condições normais como metaestáveis, especialmente a cristobalita (Iler, 1979; Xie *et al.,* 2023). Na Figura 6 é apresentado essas estruturas.

**Figura 6 - Transformações polimórficas da sílica em função da temperatura**




(A) quartzo α, (B) quartzo β (C) tridimita, (D) cristobalita.
Fonte: Xie *et al.;* (2023)

A sílica pode se apresentar na forma amorfa, caracterizada pela ausência de ordem estrutural de longo alcance, em função do arranjo aleatório dos tetraedros $[SiO_4]^{4-}$. Essa configuração não periódica proporciona à sílica amorfa uma reatividade química superior e uma área superficial específica maior em relação às formas cristalinas (Risfaheri *et al.,* 2026).

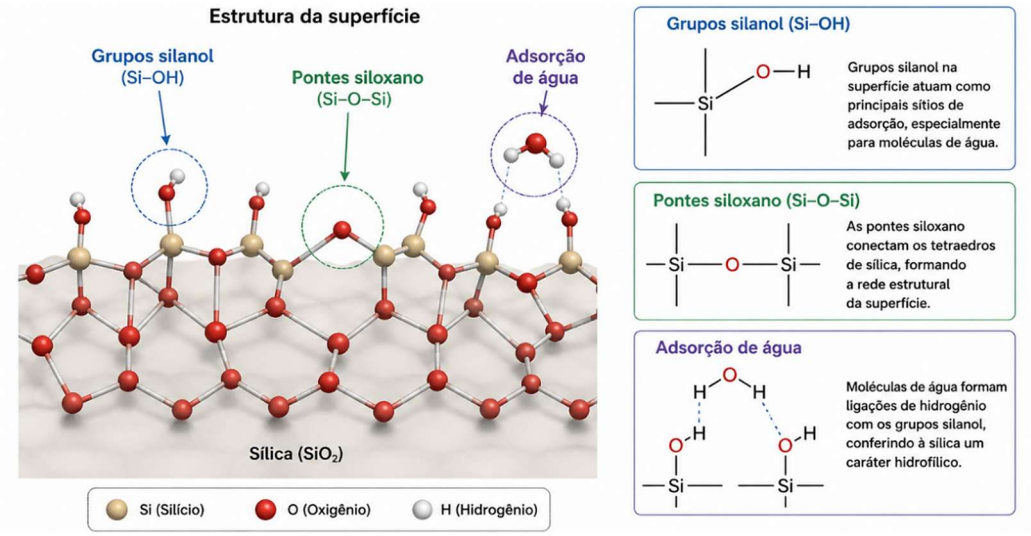
As propriedades físico-químicas da sílica desempenham um papel crucial em sua ampla utilização na indústria. Este material é quimicamente inerte e apresenta resistência acentuada à corrosão por ácidos, sendo significativamente mais resistente do que muitos materiais estruturais comuns. A dissolução da sílica ocorre apenas sob condições específicas, como na presença de ácido fluorídrico (HF) ou ácido fosfórico a altas temperaturas.

Do ponto de vista físico, apresenta elevada dureza (grau 7 na escala Mohs), ponto de fusão entre 1710 e 1756 °C e excelente estabilidade térmica, suportando operações prolongadas em temperaturas elevadas. Adicionalmente, possui baixo coeficiente de expansão térmica, o que lhe confere elevada resistência ao choque térmico (Long *et al.*, 2024; Xie *et al.*, 2023).

A química de superfície da sílica (Figura 7) exerce papel fundamental em suas interações com o meio. Sua superfície é predominantemente composta por grupos silanol (Si–OH) e pontes

siloxano (Si–O–Si). Os grupos silanol atuam como principais sítios de adsorção, especialmente para moléculas de água, conferindo à sílica um caráter naturalmente hidrofílico. Essa reatividade superficial, aliada à possibilidade de modificação química, amplia significativamente suas aplicações em áreas como catálise, adsorção seletiva e cromatografia (Iler, 1979).

**Figura 7 - Desenho esquemático da química da superfície da sílica**




Fonte: Gerado por ChatGPT modelo GPT-5.5, 2026.

A compreensão da estrutura cristalina e da reatividade superficial da sílica permite correlacionar suas propriedades com o nível de pureza alcançado, visto que a presença de impurezas metálicas afeta características ópticas, elétricas e térmicas do material, limitando sua utilização em aplicações tecnológicas de maior valor agregado (Iler, 1979; Long *et al.,* 2024).

### *3.3.2 Pureza da sílica e influência das impurezas metálicas*

A relevância econômica e tecnológica da sílica está diretamente associada ao seu grau de pureza, frequentemente classificado pela notação “N”. Nessa convenção, 3N corresponde a uma pureza de 99,9%, enquanto 5N indica 99,999%. Materiais com pureza superior a 99,995% são considerados de ultra-alta pureza e constituem insumos estratégicos para indústrias de alta tecnologia, como semicondutores, fibras ópticas e dispositivos fotovoltaicos. Nesses setores, propriedades como transparência óptica e estabilidade elétrica são críticas, exigindo níveis extremamente baixos de contaminantes (Xie *et al.*, 2023; Cubi *et al.*, 2026).

A presença de impurezas metálicas pode impactar de maneira significativa o desempenho da sílica. O ferro (Fe) é particularmente prejudicial por reduzir a transparência e introduzir coloração indesejada, além de afetar a eficiência em aplicações fotovoltaicas. O alumínio (Al) pode favorecer processos de desvitrificação e reduzir a estabilidade térmica, enquanto metais alcalinos como sódio (Na) e potássio (K) comprometem a transmitância óptica e podem atuar como dopantes não intencionais em dispositivos semicondutores. Elementos como cálcio (Ca) e magnésio (Mg) também afetam a integridade estrutural em processos de alta temperatura, favorecendo defeitos e microfissuras (Long *et al.*, 2024).

Para a remoção desses contaminantes e a obtenção de sílica com teores superiores a 99,9% (grau 3N), a lixiviação ácida configura-se como a principal rota hidrometalúrgica a ser investigada neste estudo, em razão de sua eficiência na dissolução seletiva de impurezas metálicas (Cubi *et al.,* 2026; Long *et al.,* 2025).

## 3.4 Lixiviação Ácida

### *3.4.1 Fundamentos da lixiviação ácida*

A lixiviação ácida é um processo hidrometalúrgico amplamente empregado na metalurgia extrativa para promover a dissolução de determinados componentes presentes em uma fase sólida por meio da ação de um agente ácido. Esse processo se baseia nas diferenças de reatividade entre os constituintes do material, o que permite que determinados elementos sejam solubilizados enquanto outros permanecem na fase sólida (Long *et al.*, 2025; Maltrana; Morales, 2023). Assim, a lixiviação pode ser compreendida como um mecanismo de separação química fundamentado na reatividade diferencial dos minerais.

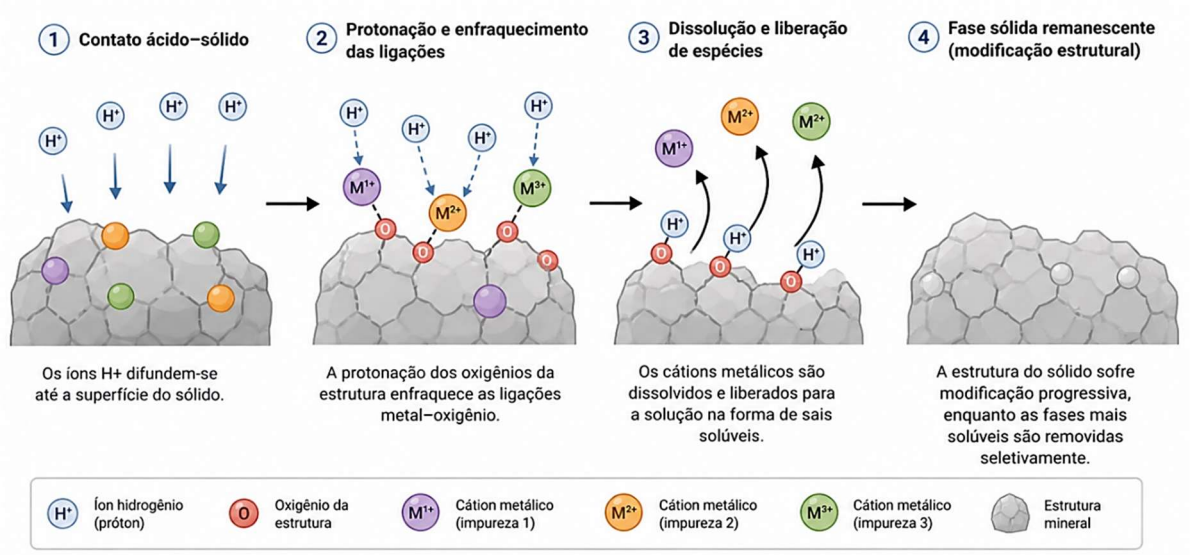
Do ponto de vista físico-químico, trata-se de um sistema heterogêneo sólido–líquido, no qual ocorrem simultaneamente fenômenos de transferência de massa, reações químicas na interface e equilíbrios termodinâmicos. A eficiência do processo está diretamente relacionada às condições operacionais e às características do material tratado, como sua composição mineralógica e sua estabilidade estrutural (Iler, 1979; Long *et al*., 2025).

De maneira fundamental, a lixiviação ácida baseia-se na interação dos íons $H^+$ com os sítios superficiais do sólido, predominantemente oxigênios estruturais e grupos hidroxila expostos, desencadeando reações de protonação que polarizam e enfraquecem as ligações metal oxigênio da rede cristalina. Esse ataque protônico desestabiliza a coordenação dos cátions metálicos, favorecendo sua liberação para a fase aquosa na forma de espécies iônicas solúveis,

enquanto a matriz sólida remanescente sofre alterações progressivas, como aumento de porosidade e formação de camadas de produto que podem atuar como barreiras difusionais (Maltrana; Morales, 2023; Long *et al*., 2025).

A Figura 8 apresenta um desenho esquemático do princípio da lixiviação ácida, elaborado com base na literatura de Long *et al*. (2025).

**Figura 8 - Desenho esquemático do princípio da lixiviação acida**




Fonte: Desenvolvido por ChatGPT modelo GPT-5.5 (2026).

No entanto, a reatividade do sistema não é governada exclusivamente pela atividade protônica. Os ânions associados ao ácido, $Cl^-$, $SO_4^{2-}$, $NO_3^-$, exercem papel relevante por meio do mecanismo de dissolução promovida por ligantes, ligand promoted dissolution. Nesse processo, a formação de complexos solúveis com os metais recém dissolvidos, como espécies cloradas de $Fe^{3+}$, $FeCl^{2+}$ e $FeCl_4^-$, desloca o equilíbrio de dissolução superficial, favorecendo a continuidade da extração e aumentando a cinética do processo (Maltrana; Morales, 2023; Long *et al*., 2025).

A intensidade desse efeito varia conforme a capacidade de coordenação de cada ânion. O $Cl^-$ atua como ligante de elevada afinidade por íons férricos, promovendo maior solubilização, o $SO_4^{2-}$ apresenta comportamento intermediário, podendo favorecer a formação de espécies ou fases secundárias menos solúveis sob condições específicas, o que pode reduzir a eficiência líquida do processo, já o $NO_3^-$ possui baixa capacidade de complexação, de modo que sua atuação lixiviante é governada predominantemente pelo efeito ácido e, em alguns casos, pelo seu caráter oxidante. Assim, sistemas ácidos mistos podem apresentar desempenho distinto

de soluções ácidas simples, ao combinar diferentes rotas de ataque químico e complexação, o que influencia diretamente a cinética e a seletividade da dissolução entre fases minerais (Maltrana; Morales, 2023; Long *et al*., 2025).

A eficácia desse mecanismo de separação química depende da seleção adequada de agentes lixiviantes, bem como da compreensão dos diferentes mecanismos de dissolução associados a cada fase mineral presente no material (Zueva *et al.*, 2025; Risfaheri *et al.*, 2026).

### *3.4.2 Agentes lixiviantes e mecanismos de dissolução*

A escolha do agente lixiviante é um dos fatores mais importantes no controle do processo, pois determina quais espécies serão preferencialmente dissolvidas e qual será o mecanismo dominante de reação. Ácidos minerais como ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) são amplamente utilizados devido à sua eficiência na dissolução de óxidos metálicos e carbonatos, enquanto ácidos oxidantes, como o ácido nítrico ($HNO_3$), podem atuar simultaneamente como agentes de dissolução e oxidação (Long *et al.*, 2025; Cubi *et al.*, 2026).

Em alguns casos, o uso de ácidos como o ácido fluorídrico (HF) possibilita a desestruturação de fases minerais mais estáveis, em função de sua elevada capacidade de ataque à rede silicatada, embora sua aplicação seja limitada devido à elevada toxicidade e às restrições operacionais associadas. De forma geral, sistemas de ácidos mistos são frequentemente empregados para ampliar a eficiência do processo, uma vez que combinam diferentes mecanismos químicos de ataque, promovendo maior abrangência na dissolução de fases minerais (Long *et al.*, 2025; Cubi *et al.*, 2026).

A Tabela 1 apresenta os principais agentes lixiviantes, bem como seus mecanismos gerais de atuação, com base em Long *et al.* (2025) e Cubi *et al.* (2026).

**Tabela 1 - Principais agentes lixiviantes e seus mecanismos gerais**

| Agente lixiviante | Principal função | Mecanismo dominante | Observação geral |
|---|---|---|---|
| HCl | Dissolução de óxidos metálicos | Reação ácido–base | Alta eficiência em fases superficiais |
| $H_2SO_4$ | Solubilização de metais | Formação de sulfatos | Estável e amplamente aplicado |
| $HNO_3$ | Oxidação e dissolução | Reações redox | Atua como oxidante auxiliar |
| HF | Ataque estrutural | Dissolução de redes estáveis | Alta reatividade |
| Misturas ácidas | Processos multicomponentes | Sinergia química | Maior eficiência global |

Fonte: Própria autora (2026).

Além da escolha dos ácidos, o rendimento do processo é fortemente influenciado pelo controle rigoroso das variáveis operacionais e dos parâmetros cinéticos, os quais determinam a velocidade das reações de dissolução e a extensão da purificação alcançada, impactando diretamente a eficiência global do processo (Khalifa *et al.*, 2019; Maltrana; Morales, 2023).

### *3.4.3 Variáveis operacionais e cinética do processo*

As variáveis operacionais exercem papel fundamental no desempenho de processos hidrometalúrgicos, uma vez que controlam diretamente tanto a cinética das reações quanto a eficiência global de dissolução dos minerais. Parâmetros como concentração do reagente lixiviante, temperatura e condições de transferência de massa influenciam a disponibilidade de espécies reativas no meio, a velocidade das reações químicas e o grau de interação sólido–líquido. Dessa forma, a compreensão desses fatores é essencial para a definição de condições operacionais otimizadas, capazes de equilibrar eficiência de extração e consumo de reagentes (Long *et al.*, 2025; Cubi *et al.*, 2026).

A disponibilidade de íons ativos $H^+$ no meio reacional depende não apenas da concentração nominal do ácido, mas também da sua constante de dissociação, a qual determina o grau de ionização e a intensidade do ataque químico sobre a fase sólida. De forma geral, o aumento da concentração e o uso de ácidos com maior grau de dissociação favorecem a taxa de dissolução, ao intensificar a protonação dos sítios superficiais e o enfraquecimento das ligações metal oxigênio. Entretanto, esse comportamento não é linear, uma vez que, em altas concentrações, a atividade efetiva dos íons $H^+$ pode ser reduzida e efeitos de transporte de massa tornam se limitantes, devido ao aumento da viscosidade do meio e à menor difusividade dos reagentes. Além disso, podem ocorrer fenômenos de saturação local e passivação superficial, como a formação de camadas de sílica ou produtos secundários, que dificultam o acesso do lixiviante às impurezas internas. Dessa forma, a eficiência do processo resulta do equilíbrio entre reatividade química, cinética de dissolução e limitações de transporte, sendo essencial a definição de condições operacionais ótimas para maximizar a seletividade e o consumo eficiente de reagentes (Long *et al*., 2025; Cubi *et al*., 2026).

A temperatura, por sua vez, afeta diretamente a cinética das reações envolvidas. O aumento da temperatura eleva a energia cinética das partículas, aumentando a frequência de colisões efetivas e, consequentemente, acelerando as taxas de reação. Além disso, determinadas reações tornam-se mais favoráveis do ponto de vista termodinâmico em temperaturas mais elevadas, o que contribui para a eficiência global do processo. Em sistemas sob pressão, esse

efeito tende a ser ainda mais significativo devido à intensificação simultânea de temperatura e transferência de massa (Long *et al.*, 2025; Qu *et al.*, 2024).

O tempo de reação também desempenha papel importante na eficiência da lixiviação. Em estágios iniciais, ocorre a dissolução mais rápida das espécies mais reativas e acessíveis. Com o avanço do processo, a velocidade de reação tende a diminuir, pois passa a ser controlada por mecanismos difusionais, nos quais os reagentes precisam atravessar camadas de produtos formadas na superfície do sólido. Dessa forma, tempos mais longos podem ser necessários para alcançar maiores níveis de remoção, embora ganhos adicionais tendam a se tornar progressivamente menores ao longo do tempo (Risfaheri *et al.*, 2026).

A relação líquido/sólido (L/S) é outro parâmetro crítico, pois determina a disponibilidade de reagente em relação à quantidade de material sólido. Relações muito baixas podem limitar o processo por insuficiência de reagente, enquanto relações muito altas podem aumentar o consumo de insumos sem melhoria proporcional na eficiência. Assim, o ajuste adequado dessa variável é essencial para garantir equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica (Long *et al.*, 2025; Qu *et al*., 2024).

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos principais parâmetros operacionais e suas influências no processo de lixiviação ácida, com base em Long *et al.* (2025) e Qu *et al.* (2024).

**Tabela 2 - Efeito dos principais parâmetros operacionais na lixiviação**

| Parâmetro | Efeito principal | Impacto no processo |
|---|---|---|
| Concentração de ácido | Aumenta disponibilidade de íons | Acelera dissolução até limite operacional |
| Temperatura | Eleva energia cinética | Intensifica cinética de reação |
| Tempo de reação | Permite avanço da dissolução | Controla grau de extração |
| Relação L/S | Define disponibilidade de reagente | Afeta eficiência e consumo |
| Agitação | Reduz camada difusional | Melhora transferência de massa |
| Pré-tratamento | Altera estrutura do sólido | Facilita acesso ao interior |

Fonte: Própria autora (2026).

Do ponto de vista cinético, a lixiviação pode ser descrita por modelos que consideram a progressão da reação da superfície para o interior da partícula sólida, sendo comumente representada pelo modelo de núcleo encolhente. Nesse contexto, a etapa limitante pode ser tanto a reação química na interface quanto a difusão dos reagentes através da camada de produtos formada, dependendo das condições do sistema. Em muitos casos, observa-se uma transição entre controle cinético e difusional ao longo do processo (Long *et al.*, 2025; Cubi *et al.*; 2026).

O pré-tratamento térmico, embora não faça parte da etapa de lixiviação em si, pode exercer influência significativa no desempenho do processo. O aquecimento do material induz tensões internas e microfissuras na estrutura sólida, além de promover alterações mineralógicas que aumentam a acessibilidade das espécies químicas presentes. Como consequência, o contato entre reagente e sólido é facilitado, o que tende a aumentar a eficiência da etapa de lixiviação subsequente (Cubi *et al.,* 2026; Qu *et al.,* 2024).

Nesse contexto, Cubi *et al.* (2026) demonstram que a torrefação de curta duração, associada ao descompasso de expansão térmica entre quartzo e minerais ferríferos, gera tensões termoelásticas nas interfaces dos grãos, resultando na nucleação de microfissuras e no aumento da conectividade porosa, o que amplia a área reativa disponível para a lixiviação. De forma complementar, Qu *et al.* (2024) evidenciam que o aquecimento seguido de resfriamento brusco intensifica a formação desses defeitos estruturais e favorece a migração de impurezas como Fe e Al do interior do retículo cristalino para regiões mais superficiais, onde se tornam mais acessíveis à dissolução. Assim, o conjunto desses mecanismos confirma que o tratamento térmico atua como uma etapa de ativação microestrutural, potencializando a eficiência da lixiviação subsequente ao aumentar simultaneamente a reatividade superficial e a acessibilidade das impurezas.

## 3.5 Tratamento Térmico

O tratamento térmico por calcinação é uma operação unitária amplamente empregada na metalurgia extrativa, baseada na aplicação de energia térmica controlada para promover transformações físico-químicas em fases minerais sólidas. Do ponto de vista termodinâmico e cinético, esse processo pode envolver desidratação, desidroxilação, mudanças de fase cristalina, reorganização estrutural e aumento da reatividade superficial (Cubi *et al*., 2026; Qu *et al*., 2024). Em sistemas minerais complexos, a calcinação atua principalmente na instabilização de fases hidratadas e na indução de defeitos cristalinos, favorecendo etapas subsequentes de separação física e lixiviação química (Iler, 1979; Xie *et al*., 2023; Cubi *et al.,* 2026).

Em materiais naturais e resíduos minerais contendo sílica, o quartzo ($SiO_2$) exerce papel estrutural central devido à sua elevada estabilidade química e predominância volumétrica. Sua principal transformação ocorre na transição quartzo α para quartzo β em aproximadamente 573 °C, envolvendo reorganização da estrutura cristalina sem ruptura da rede Si–O, mas com expansão volumétrica abrupta e anisotrópica. Em sistemas multifásicos, esse comportamento

gera incompatibilidades de deformação entre o quartzo e minerais associados, contribuindo para a formação de tensões internas (Cubi *et al.,* 2026; Qu *et al.,* 2024).

Além disso, o aquecimento promove transformações relevantes em fases secundárias, como a desidroxilação da goethita (α-FeOOH) com formação de hematita (α-$Fe_2O_3$), mais estável termicamente, e o colapso estrutural de minerais aluminosilicáticos como a caulinita, que resulta em metacaulinita amorfa de maior desordem estrutural e reatividade (Carmignano *et al*., 2021; Cubi *et al*., 2026).

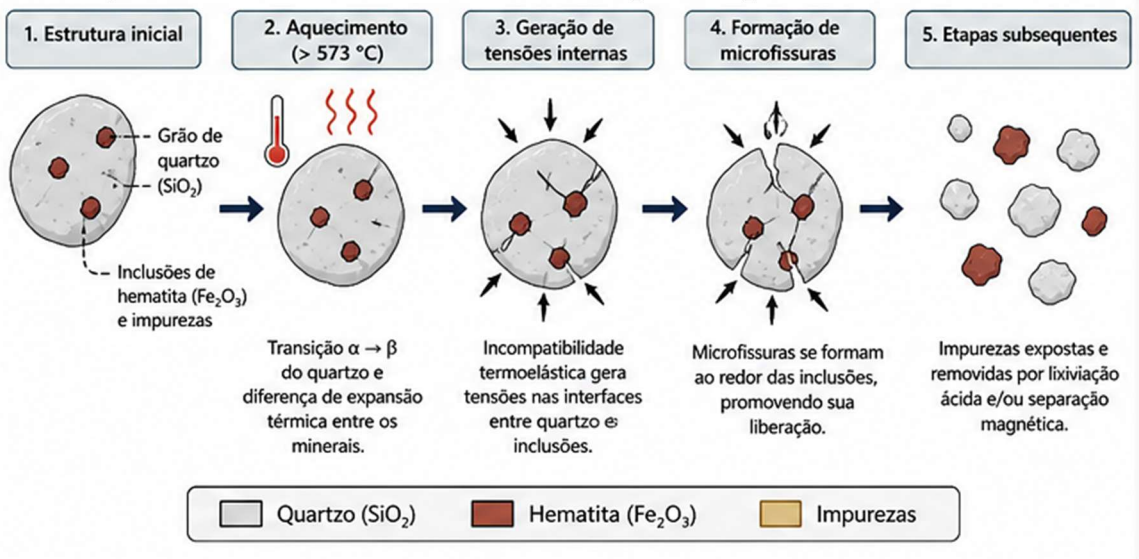
Nesse contexto, um dos efeitos mais relevantes da calcinação em sistemas heterogêneos é a geração de tensões termoelásticas decorrentes da diferença entre coeficientes de expansão térmica das fases minerais. Esse descompasso provoca concentração de tensões nas interfaces, resultando em microfissuração, aumento de porosidade e criação de caminhos preferenciais para difusão de reagentes, o que intensifica a reatividade global do material (Cubi *et al*., 2026).

Nos resíduos de minério de ferro, esse mecanismo é ainda mais significativo devido à distribuição microestrutural típica, na qual o quartzo atua como fase contínua e os óxidos de ferro ocorrem como inclusões ou preenchimentos intergranulares. A interação térmica entre essas fases favorece a desagregação estrutural do agregado mineral, ampliando a acessibilidade das impurezas e condicionando o comportamento do sistema durante o processamento (Cubi *et al.*, 2026).

Do ponto de vista do processamento mineral, os estudos de Khalifa *et al.* (2019), Qu *et al.* (2024) e Cubi *et al*. (2026) demonstram que a combinação entre tratamento térmico e lixiviação química promove aumentos expressivos na pureza da sílica, frequentemente acima de 99%. Esse desempenho está associado principalmente à migração de impurezas para regiões superficiais por gettering (Khalifa *et al*., 2019), à intensificação de defeitos estruturais e maior penetração do lixiviante via choque térmico (Qu *et al.,* 2024), e à formação de microfissuras por tensões termoelásticas que ampliam a área reativa (Cubi *et al.,* 2026). Assim, a calcinação se estabelece como etapa preparatória essencial para potencializar a eficiência da lixiviação e o grau de pureza da sílica obtida.

A Figura 9 apresenta um desenho esquemático do mecanismo de liberação de impurezas por tratamento térmico, elaborado com base na literatura de Khalifa *et al.* (2019) e Qu *et al*. (2024).

**Figura 9 - Mecanismo de liberação de impurezas por tratamento térmico**




Fonte: Gerado por ChatGPT modelo GPT-5.5 (2026).

Em abordagens mais recentes, observa-se uma tendência de otimização energética dos processos térmicos, com redução do tempo de residência e aplicação de estratégias como a calcinação em materiais brutos. Essa abordagem explora de forma mais eficiente os efeitos de choque térmico e incompatibilidade de expansão entre fases minerais, maximizando a geração de microdefeitos estruturais em menor tempo de processamento. O resultado é o aumento da liberação mineral e da eficiência de separação com menor consumo energético, o que é um fator crítico para viabilidade industrial em larga escala (Xie *et al.*, 2023).

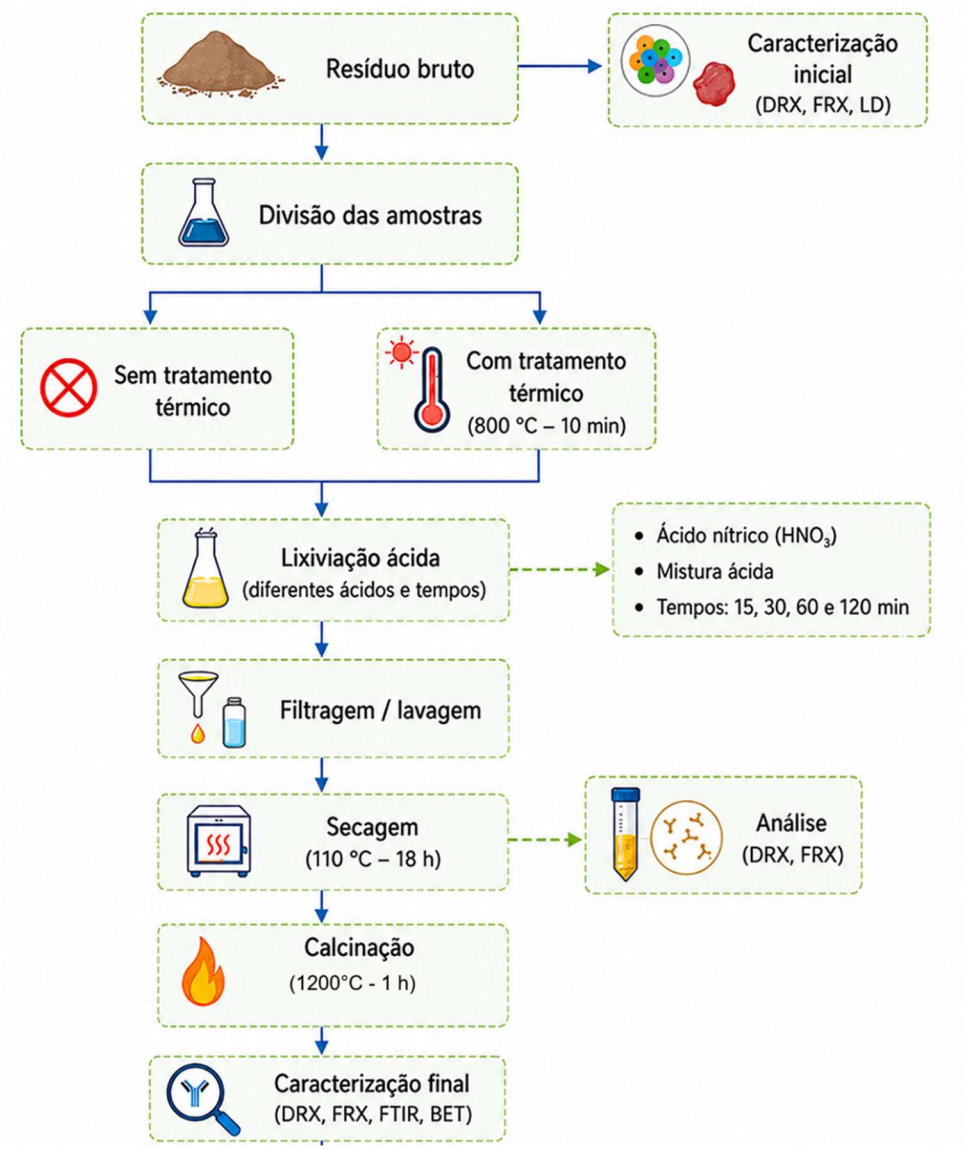
Dessa forma, a calcinação pode ser entendida como um processo de modificação estrutural e ativação microestrutural de sistemas minerais. Seus efeitos decorrem principalmente da interação entre minerais com diferentes comportamentos térmicos, cuja incompatibilidade favorece a formação de defeitos estruturais e contribui para a melhoria da eficiência em etapas posteriores de separação e purificação (Cubi *et al.*, 2026).

# 4 MATERIAIS E MÉTODOS

## 4.1 Descrição Geral do Trabalho

O fluxograma geral do processo experimental desenvolvido neste trabalho é apresentado na Figura 10. O diagrama abrange todas as etapas do estudo, desde a caracterização inicial do resíduo proveniente do Complexo Metamórfico Bação (CMB) até as etapas finais de purificação e caracterização da sílica obtida, permitindo uma visão integrada do procedimento experimental adotado.

**Figura 10 - Fluxograma geral do processo experimental**




Fonte: Própria autora (2026).

O trabalho inicia-se com a caracterização química e mineralógica do resíduo arenoso. Posteriormente, uma fração do material é submetida a tratamento térmico, enquanto outra é mantida em sua condição original de recebimento.

Na sequência, realiza-se o processo de lixiviação ácida, seguido das etapas de filtração e secagem. As amostras que apresentaram os melhores resultados são então submetidas a uma etapa adicional de calcinação, com o objetivo de avaliar a influência desse parâmetro nas características da sílica obtida.

Por fim, as sílicas provenientes da lixiviação com melhor desempenho, bem como a sílica calcinada, são submetidas a caracterização físico-química e mineralógica.

## 4.2 Materiais

O resíduo analisado neste trabalho (Figura 11) é oriundo do Complexo Metamórfico Bação, localizado na região do Quadrilátero Ferrífero. Trata-se de um resíduo arenoso que passou pelas etapas de deslamagem e separação magnética durante o beneficiamento. A deslamagem teve como finalidade eliminar partículas finas de diversas composições, como argilas e coloides, enquanto a separação magnética foi realizada para reduzir a quantidade de fases ferrosas contidas no material. Além das etapas de beneficiamento, a amostra também passou por um processo adicional de cominuição.

**Figura 11 - Resíduo arenoso de minério de ferro do complexo metamórfico bação**




Fonte: Própria autora, 2026.

## 4.3 Métodos

### *4.3.1 Caracterização do resíduo e da sílica obtida*

A caracterização inicial do resíduo foi realizada por difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e análise granulométrica por difração a laser (LD), com o objetivo de determinar as fases mineralógicas, a composição química e a distribuição granulométrica do material.

A análise por DRX, realizada no equipamento Shimadzu XRD-7000, foi empregada para identificação das fases cristalinas presentes no resíduo. O ensaio foi conduzido em modo de varredura contínua, no intervalo angular de 5° a 80° (2θ), com passo de 0,02° e tempo de contagem de 1 s por passo.

A técnica de FRX, realizada no equipamento Shimadzu EDX-720, foi utilizada para a determinação da composição química do material. As análises foram conduzidas sob atmosfera de vácuo, sendo os resultados expressos em termos de óxidos, conforme a prática usual para materiais geológicos e minerais.

A distribuição granulométrica foi determinada por difração a laser, utilizando o equipamento CILAS 1090, permitindo avaliar o tamanho das partículas do resíduo, parâmetro relevante para as etapas subsequentes de processamento, como lixiviação e filtração.

Após a etapa de lixiviação, foi realizada a caracterização da sílica obtida com o objetivo de avaliar sua composição e estrutura após o processamento. As análises de DRX e FRX foram conduzidas sob as mesmas condições experimentais aplicadas ao resíduo inicial, permitindo a comparação direta entre as amostras. O DRX foi utilizado para identificação das fases cristalinas presentes no produto final, enquanto o FRX foi empregado para a determinação da composição química residual e verificação da eficiência da remoção de impurezas. Ambas as técnicas foram realizadas nas mesmas condições previamente adotadas na caracterização do resíduo inicial, garantindo consistência metodológica e comparabilidade dos resultados.

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para identificar os grupos funcionais característicos da sílica, com ênfase nas vibrações associadas às ligações Si–O–Si e Si–OH, bem como para detectar possíveis resíduos de espécies superficiais remanescentes do processo químico.

A análise foi realizada em um espectrômetro Thermo Fisher Scientific Nicolet Summit PRO, na faixa espectral de 4000 a 400 $cm^{-1}$, com resolução de 4 $cm^{-1}$ e 8 varreduras (*scans*)

acumuladas. Esses parâmetros foram adotados para melhorar a relação sinal/ruído e garantir maior definição e confiabilidade das bandas de absorção obtidas.

A área superficial específica e a porosidade da sílica foram determinadas por análise de adsorção de nitrogênio (BET), utilizando o equipamento Nova Station B (*Quantachrome*), permitindo avaliar as características texturais do material obtido após a lixiviação, parâmetros importantes para aplicações subsequentes do produto.

Para a preparação da amostra, foi utilizada massa de 0,8537 g, acondicionada em célula de 1 $cm^3$, sendo submetida à etapa de desgaseificação (*outgas*) por 12,0 horas a 200,0 °C, com o objetivo de remover umidade e espécies adsorvidas previamente à análise.

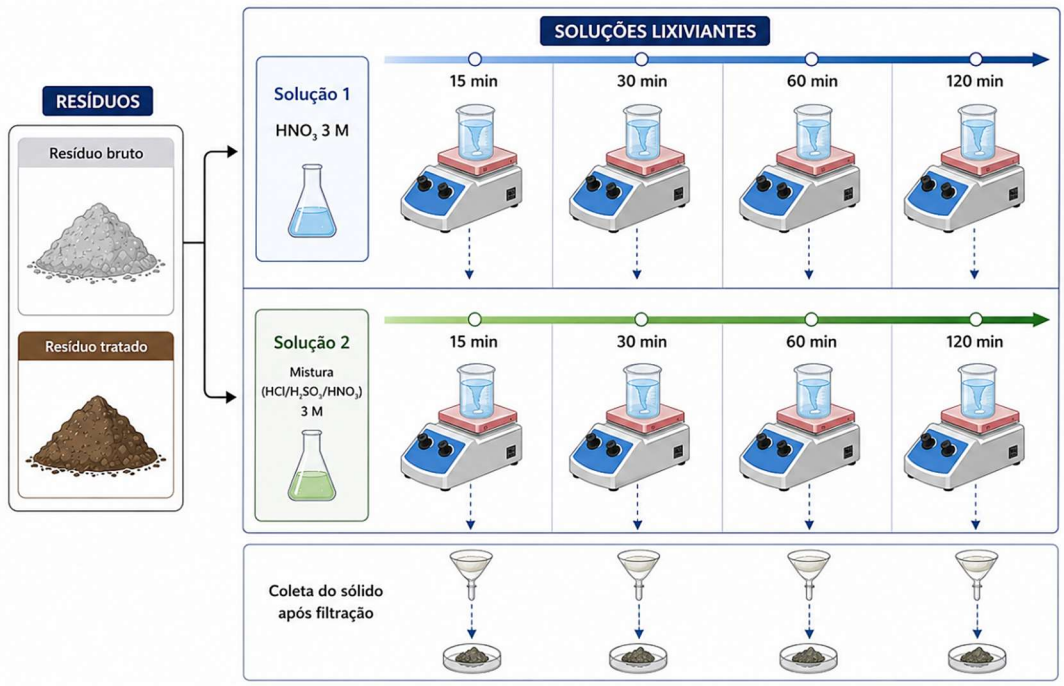
As condições de ensaio empregaram nitrogênio ($N_2$) como adsorbato, com temperatura de banho de 273,0 K e temperatura de adsorção de 77,350 K. Foram adotadas tolerâncias de pressão de 0,100/0,100 (adsorção/dessorção), tempo de equilíbrio de 60/60 s e tempo limite de equilíbrio de 240/240 s, com tempo total de análise de 61,5 min.

### *4.3.2 Processamento do material*

O resíduo foi subdividido para permitir a comparação entre o material in natura e o material previamente submetido ao tratamento térmico. O pré-tratamento foi realizado em mufla a 800 °C por 10 minutos, condição definida com base em Cubi *et al*. (2026), com o objetivo de promover a eliminação de matéria orgânica, a desidroxilação de fases hidratadas e possíveis transformações mineralógicas capazes de alterar a reatividade do material.

Posteriormente, as amostras previamente submetidas ou não ao tratamento térmico foram encaminhadas à etapa de lixiviação ácida. Conforme apresentado na Figura 12, o processo foi conduzido considerando três variáveis principais: tipo de resíduo, tempo de reação e composição da solução lixiviante. A definição dos parâmetros operacionais foi fundamentada nos estudos de *Long et al.* (2025), que destacam a seletividade e a sinergia de sistemas ácidos na remoção de contaminantes metálicos, e nos trabalhos de Cubi *et al.* (2026) e Risfaheri *et al.* (2026), os quais evidenciam a influência da temperatura e do tempo de reação na cinética de dissolução e na eficiência global do processo de lixiviação ácida.

**Figura 12 - Esquema do processo de lixiviação ácida**



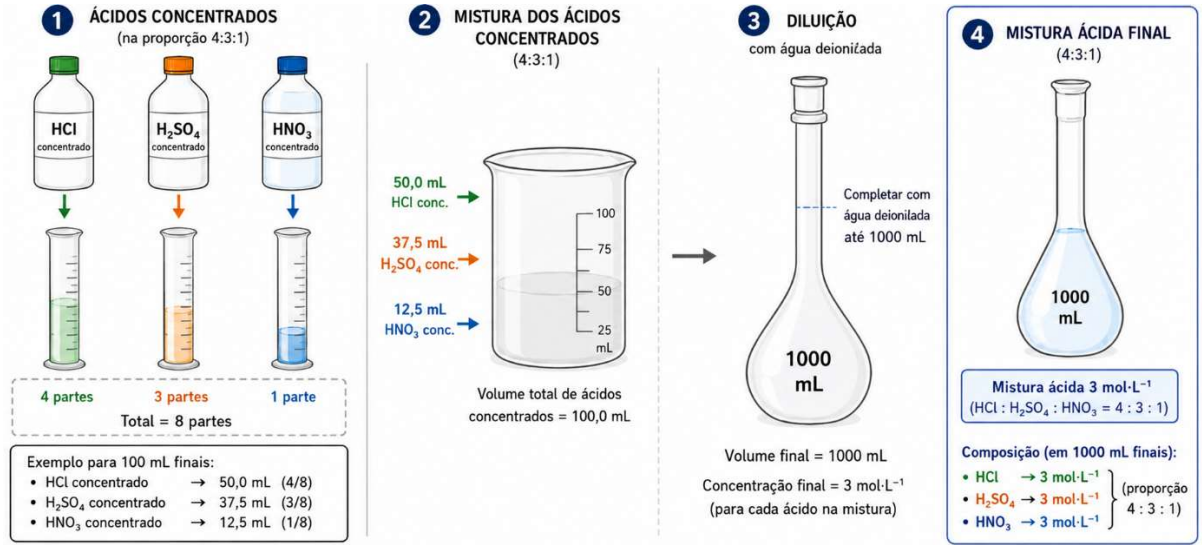

Fonte: Própria autora (2026).

Os ensaios foram realizados com relação sólido/líquido de 1:20 ($g \cdot mL^{-1}$), utilizando-se 10 g de resíduo para 200 mL de solução lixiviante, proporção adotada com base em Okada *et al.* (2002), que indicam essa faixa como adequada para garantir disponibilidade de reagentes e evitar limitações cinéticas por saturação da solução. O processo foi conduzido a 80 °C, sob agitação constante, condição fundamentada em Risfaheri *et al.* (2026), que demonstram sua eficiência na aceleração da cinética de dissolução e no favorecimento do transporte de massa sem atingir condições de ebulição, assegurando estabilidade operacional e reprodutibilidade.

Ressalta-se que a lixiviação foi conduzida em sistema aberto, sem utilização de refluxo, opção metodológica adotada em consonância com Risfaheri *et al.* (2026) e Cubi *et al.* (2026), uma vez que a temperatura de 80 °C permite operação segura abaixo das condições de ebulição das soluções ácidas utilizadas, reduzindo complexidade experimental, evitando perdas significativas por volatilização e mantendo a reprodutibilidade dos ensaios.

A preparação da mistura ácida foi fundamentada na combinação dos ácidos concentrados (HCl, $H_2SO_4$ e $HNO_3$) na proporção volumétrica fixa de 4:3:1, conforme a metodologia descrita por Cubi *et al*. (2026). O procedimento de preparo é apresentado esquematicamente na Figura 13, a qual ilustra as etapas de preparação das soluções individuais, a definição das proporções volumétricas e a etapa final de homogeneização e diluição da mistura ácida.

**Figura 13 - Desenho esquemático do preparo da solução ácida**




Fonte: Própria autora (2026).

### *4.3.3 Etapas de separação, secagem, calcinação*

Ao final dos ensaios de lixiviação, as suspensões foram submetidas à filtração a vácuo para separação das fases sólida e líquida. O material sólido obtido foi lavado com água destilada até neutralização do pH e, posteriormente, seco em estufa a 110 °C por 18 horas, visando à remoção da umidade residual e à estabilização das amostras.

Após a secagem, as amostras foram novamente caracterizadas por fluorescência de raios X (FRX), sendo todos os resultados comparados diretamente com o FRX do resíduo como recebido antes da lixiviação. A quantificação da remoção de impurezas foi realizada pela diferença entre os teores de óxidos iniciais e finais, sendo essa variação convertida em porcentagem de remoção para cada elemento analisado, permitindo a avaliação direta da eficiência do processo de lixiviação. As análises por difração de raios X (DRX) foram realizadas apenas nas amostras que apresentaram os resultados mais relevantes.

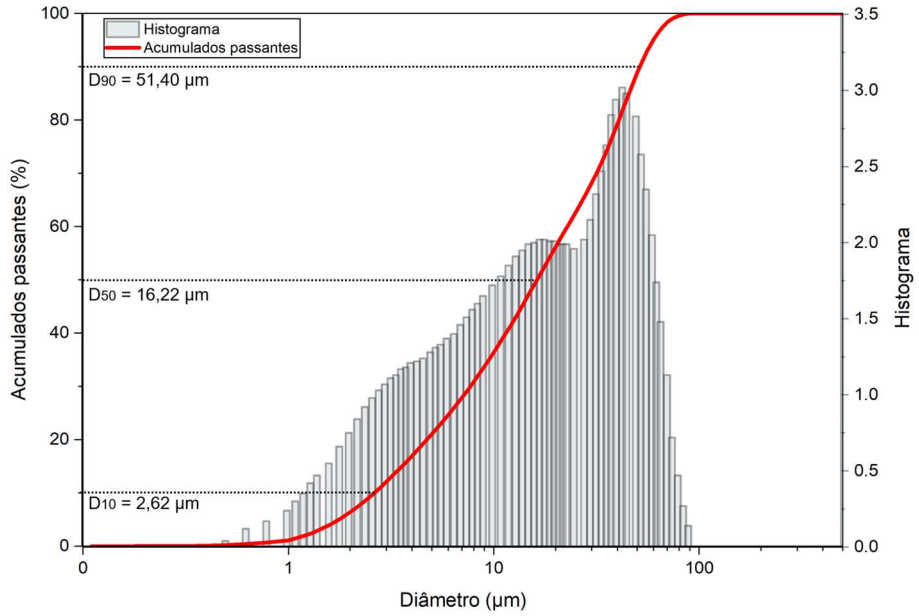
As amostras que apresentaram maior enriquecimento em sílica foram posteriormente submetidas à calcinação a 1200 °C por 1 hora, condição estabelecida com base em Iler (1979), que descreve o uso de tratamentos térmicos em altas temperaturas como etapa para avaliação da estabilidade estrutural, eliminação de fases residuais e reorganização da estrutura da sílica em materiais silicosos.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 5.1 Caracterização do Resíduo

Inicialmente, realizou-se a análise granulométrica a laser do resíduo em estudo, cujo resultado é apresentado na Figura 14. Observa-se que o resíduo apresenta diâmetro mediano (D50) de 16,22 µm. Ao confrontar esse valor com a literatura de Carmignano *et al.* (2021), que estabelece a faixa granulométrica típica para resíduos arenosos entre 40 e 150 µm, verifica-se que o material analisado apresenta dimensões reduzidas, condizentes com a etapa adicional de cominuição à qual foi submetido.

**Figura 14 - Distribuição granulométrica do resíduo em estudo**




Fonte: Própria autora (2026).

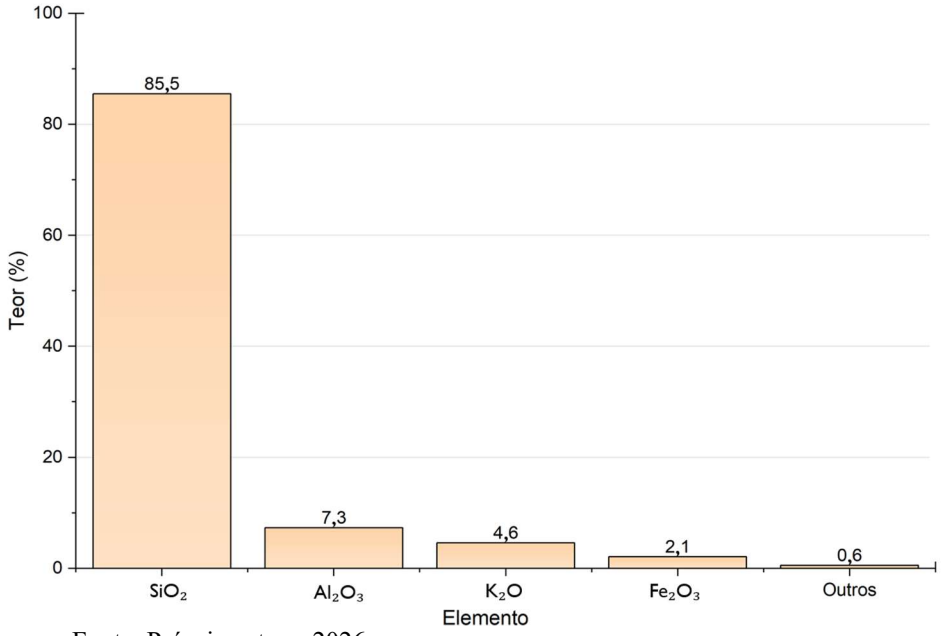
A heterogeneidade granulométrica do resíduo, característica também destacada por Carmignano *et al.* (2021), é corroborada pela ampla distribuição observada na Figura 14. O D10 foi de 2,62 µm, enquanto o D90 atingiu 51,40 µm, evidenciando uma distribuição granulométrica relativamente ampla e a presença de partículas com diferentes faixas de tamanho. Essa heterogeneidade está associada não apenas à ampla variação granulométrica do resíduo arenoso, mas também à coexistência de partículas liberadas e agregados minerais, além das diferenças mineralógicas entre as fases presentes no material, conforme descrito por Carmignano *et al.* (2021) e Cubi *et al.* (2026). Adicionalmente, fatores relacionados à variabilidade da rocha de origem e à eficiência das etapas de beneficiamento contribuem

diretamente para a distribuição não uniforme das partículas no resíduo, como apontam Souza *et al.* (2020) e Carmignano *et al.* (2021).

A granulometria constitui um fator relevante para o processo de lixiviação ácida, uma vez que partículas menores apresentam maior área superficial disponível para reação, conforme discutido por Maltrana e Morales (2023) e Long *et al.* (2025). Nesse contexto, a granulometria reduzida observada no material analisado tende a favorecer o contato entre o reagente lixiviante e as impurezas presentes no resíduo, podendo contribuir para maior eficiência na remoção dessas fases, segundo Freitas (2026).

A Figura 15 apresenta a composição química do resíduo obtida por fluorescência de raios X (FRX). A análise demonstrou que o resíduo é constituído majoritariamente por sílica, correspondendo a aproximadamente 86% da composição total. Além disso, foram identificados teores de 7,3% de óxido de alumínio ($Al_2O_3$), 4,6% de óxido de potássio ($K_2O$) e 2,1% de óxido de ferro III ($Fe_2O_3$). Essa composição já era esperada, tendo em vista as etapas de beneficiamento às quais o resíduo foi submetido, conforme relatado por Carmignano *et al.* (2021).

**Figura 15 - Análise química do resíduo em estudo**




Fonte: Própria autora, 2026.

Ao comparar os resultados obtidos com a literatura, observa-se que o teor de $SiO_2$ encontra-se na extremidade superior da faixa típica reportada para resíduos arenosos, descrita por Carmignano *et al.* (2021) e também por Pires *et al.* (2019) para materiais do Quadrilátero

Ferrífero, entre aproximadamente 30% e 90%, indicando que o material analisado apresenta elevada concentração de quartzo.

Em contrapartida, o teor de $Fe_2O_3$ observado foi significativamente inferior aos valores normalmente reportados para resíduos arenosos de flotação de itabiritos, que geralmente variam entre 8% e 48%, conforme Carmignano *et al.* (2021) e Pires *et al.* (2019), evidenciando a elevada eficiência das etapas de beneficiamento na remoção das fases ferríferas presentes no material.

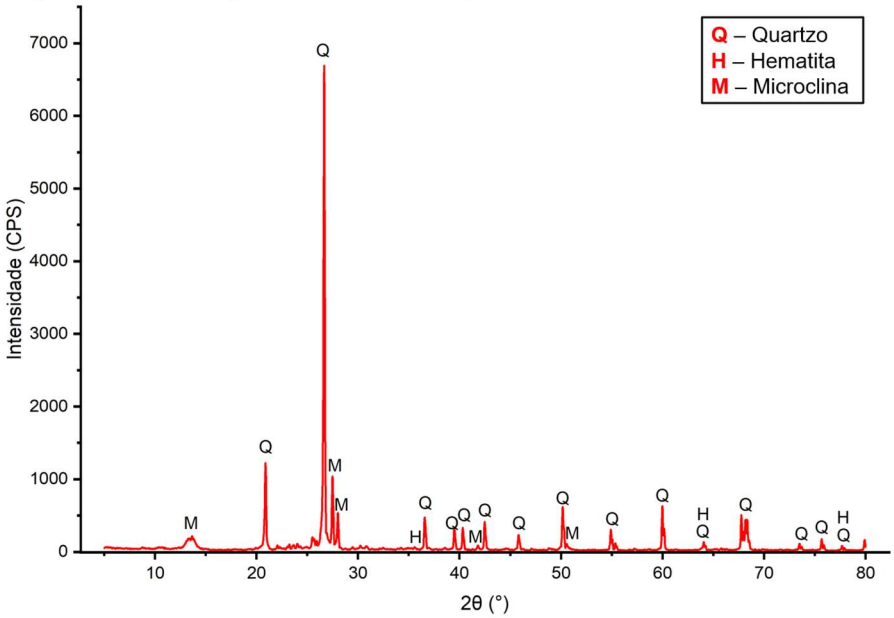
Os teores de $Al_2O_3$ e $K_2O$ sugerem a permanência de minerais de ganga no resíduo, principalmente aluminossilicatos e minerais potássicos. A presença simultânea dessas impurezas pode estar associada a fases mineralógicas como microclina, micas e outros feldspatos potássicos, os quais já foram reportados em resíduos ferruginosos do Quadrilátero Ferrífero por Silva *et al.* (2006) e também discutidos em revisões mais recentes por Bragagnolo *et al*. (2025). A microclina, em especial, constitui um feldspato potássico rico em alumínio e potássio, justificando os teores relativamente elevados de $Al_2O_3$ e $K_2O$ observados na amostra.

Embora os teores de $Fe_2O_3$ observados após as etapas de beneficiamento sejam relativamente baixos, o ferro ainda permanece como uma impureza relevante no processo de purificação da sílica. Entretanto, considerando a composição química do resíduo analisado, os compostos associados ao alumínio e ao potássio passam a representar os principais alvos da lixiviação ácida, uma vez que permanecem em concentrações mais expressivas no material e apresentam maior estabilidade química frente ao processo, segundo Pires *et al.* (2019).

Por fim, realizou-se a análise da composição mineralógica do resíduo por meio de difração de raios X (DRX), cujo resultado é apresentado na Figura 16. Observa-se a presença de três principais fases mineralógicas: quartzo, hematita e microclina, em concordância com a literatura disponível para resíduos do Quadrilátero Ferrífero, conforme descrito por Silva *et al.* (2006), Pires *et al.* (2019) e Bragagnolo *et al.* (2025).

A predominância da fase quartzo está em concordância com os elevados teores de $SiO_2$ obtidos na análise química por FRX, confirmando o caráter predominantemente silicoso do resíduo, conforme discutido por Carmignano *et al.* (2021) e Pires *et al.* (2019). A identificação da hematita indica a permanência de fases ferríferas residuais mesmo após as etapas de separação magnética, o que também é observado em resíduos de beneficiamento de itabiritos descritos por Souza *et al.* (2020) e Cubi *et al.* (2026). Já a presença da microclina corrobora os teores de $Al_2O_3$ e $K_2O$ observados na análise química, sendo um feldspato potássico frequentemente reportado em resíduos do Quadrilátero Ferrífero, conforme Silva *et al.* (2006) e Bragagnolo *et al.* (2025).

**Figura 16 - Composição mineralógica do resíduo como recebido**




Fonte: Própria autora (2026)

Dessa forma, os resultados mineralógicos obtidos por DRX mostram-se coerentes com as caracterizações granulométrica e química previamente realizadas nesta pesquisa, consolidando a consistência dos dados obtidos ao longo das etapas de caracterização do resíduo.

## 5.2 Processo de Lixiviação Ácida

### *5.2.1 Efeito do tempo de lixiviação utilizando ácido nítrico: resíduo in natura*

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o resíduo arenoso na condição como recebido após o processo de lixiviação com ácido nítrico. A Figura 17 apresenta as amostras lixiviadas para os quatro tempos avaliados, permitindo a comparação visual da evolução do material ao longo do tratamento.

A coloração acinzentada observada na amostra inicial, apresentada anteriormente na Figura 11, pode estar associada à presença de filito no resíduo analisado. O filito é uma rocha metamórfica comumente associada aos corpos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero e caracterizada por elevada concentração de quartzo, além de minerais acessórios como micas e feldspatos, conforme descrito por Silva *et al.* (2006) e Pires *et al.* (2019). Durante as etapas de extração e beneficiamento mineral, essa rocha é intensamente fragmentada e moída, originando partículas finas que passam a compor o resíduo arenoso, como relatado por Carmignano *et al.* (2021) e Souza *et al.* (2020). Mesmo após essas etapas, tais partículas podem preservar a

tonalidade cinza típica do filito, o que justifica a coloração inicial observada no material, conforme discutido por Freitas (2026).

**Figura 17 - Amostras de resíduo após o processo de lixiviação com ácido nítrico**




Fonte: Própria autora (2026)

Ao longo da lixiviação ácida, observa-se uma alteração gradual na coloração do resíduo, que está diretamente relacionada à remoção das impurezas metálicas presentes no material, principalmente compostos à base de ferro, conforme discutido por Khalifa *et al.* (2019) e Freitas (2026). Nos tempos iniciais de tratamento (15 e 30 minutos), as amostras apresentam tonalidade amarelada associada à dissolução dos óxidos e hidróxidos de ferro presentes na superfície dos grãos, conforme relatado por Khalifa *et al.* (2019). Parte dessas espécies é solubilizada em meio ácido, enquanto outra parcela pode permanecer adsorvida às partículas de sílica ou retida em microfissuras, contribuindo para a manutenção da coloração amarelada após a filtração e lavagem, segundo Freitas (2026)

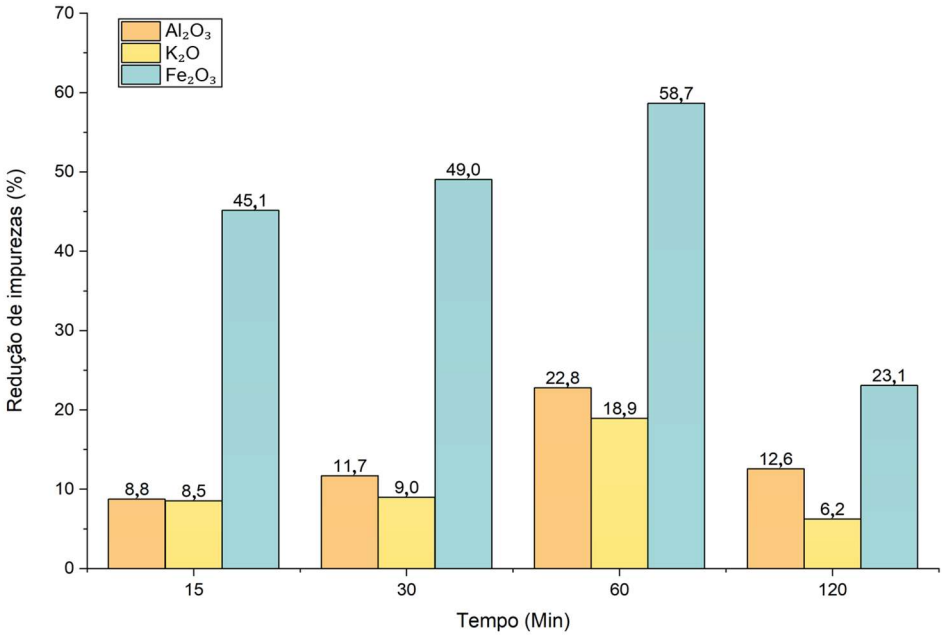
Aos 60 minutos de reação, observa-se um clareamento mais intenso da amostra, indicando maior eficiência na remoção das impurezas superficiais. Em contrapartida, no tempo de 120 minutos, verifica-se novamente o surgimento de tonalidades amareladas, possivelmente associado à penetração do agente lixiviante em microfissuras e descontinuidades estruturais dos grãos minerais, conforme descrito por Long *et al*. (2025). Esse fenômeno favorece a exposição

e a liberação de espécies ricas em ferro anteriormente confinadas em regiões internas das partículas.

Embora as alterações de coloração forneçam evidências qualitativas da remoção de impurezas durante a lixiviação, a avaliação da eficiência do processo requer a análise quantitativa da composição química do material. Dessa forma, os resultados obtidos por fluorescência de raios X permitem verificar a extensão da remoção dos principais elementos contaminantes presentes no resíduo e correlacionar essas variações com as mudanças visuais observadas nas amostras.

A Figura 18 apresenta os percentuais de redução das impurezas após o processo de lixiviação com ácido nítrico. Observa-se que os resultados de FRX corroboram as observações visuais apresentadas na Figura 17. Verifica-se que a eficiência de remoção das impurezas aumenta progressivamente entre 15 e 60 minutos de lixiviação, indicando que o ácido nítrico promove a dissolução gradual das fases minerais mais reativas e das impurezas localizadas nas regiões mais acessíveis das partículas. Entretanto, após 120 minutos, verifica-se uma redução nos percentuais de remoção para todas as impurezas avaliadas ($Fe_2O_3$: 58,7% para 23,1%; $Al_2O_3$: 22,8% para 12,6%; $K_2O$: 18,9% para 6,2%).

**Figura 18 - Redução de impurezas após o processo de lixiviação com ácido nítrico**




Fonte: Própria autora (2026).

Tal comportamento pode ser explicado principalmente pelas limitações difusionais em microfissuras presentes nos grãos minerais, conforme descrito por Long *et al.* (2025) e Freitas

(2026). Nessas regiões, o agente lixiviante consegue penetrar e promover a dissolução local das espécies metálicas, porém a remoção desses íons para o meio externo é dificultada pela baixa taxa de transporte de massa, favorecendo seu acúmulo interno ao longo do tempo de reação, como também discutido por Long *et al.* (2025). Esse mecanismo contribui para a redução da eficiência global do processo em tempos prolongados de lixiviação e está de acordo com o reaparecimento de tonalidades amareladas observado visualmente nas amostras tratadas por 120 minutos. Para esse comportamento, também pode-se considerar a ocorrência de processos de reprecipitação localizada e adsorção de espécies metálicas em superfícies e microfissuras, favorecidos pela formação de fases coloidais de sílica durante a lixiviação, o que pode contribuir para a retenção de íons dissolvidos e redução da eficiência global em tempos mais longos, conforme proposto por Zueva *et al*. (2025) e Freitas (2026).

Dentre os elementos avaliados, o ferro apresentou os maiores percentuais de remoção, atingindo 58,7% após 60 minutos de lixiviação. Esse comportamento está de acordo com os resultados reportados por Long *et al.* (2025), que indicam que a lixiviação do ferro ocorre predominantemente por um mecanismo controlado por reação química. O ferro encontra-se associado a fases minerais como hematita e silicatos ferríferos, nas quais está presente em ligações químicas relativamente estáveis. Nesse contexto, o processo de dissolução inicia-se com a adsorção e protonação de íons $H^+$ na superfície dessas fases, promovendo o enfraquecimento das ligações Fe–O e a consequente liberação de $Fe^{3+}$ para a fase aquosa (Long *et al.*, 2025; Freitas, 2026). Além disso, a manutenção dos íons em solução é favorecida pela formação de complexos com espécies do meio ácido, o que reduz a possibilidade de reprecipitação e sustenta a continuidade da dissolução (Long *et al.*, 2025). Dessa forma, o aumento do tempo de contato entre o ácido e o sólido favorece a continuidade das reações de dissolução e, consequentemente, a remoção progressiva do ferro presente nas regiões mais acessíveis do material.

Para o alumínio, a remoção máxima observada foi de 22,8%. Diferentemente do ferro, sua extração é fortemente limitada por restrições difusionais, uma vez que o elemento se encontra incorporado à estrutura de aluminossilicatos, conforme discutido por Silva *et al.* (2006) e Bragagnolo *et al.* (2025). Esse comportamento é compatível com os resultados mineralógicos obtidos por DRX, que indicaram a presença de microclina. Nessa estrutura, o alumínio está integrado à rede cristalina, dificultando o acesso do agente lixiviante aos sítios reativos, conforme também observado por Freitas (2026). Assim, a remoção ocorre preferencialmente nas regiões mais externas das partículas, enquanto o alumínio presente no interior permanece protegido pela matriz mineral.

Comportamento semelhante é observado para o potássio, cuja remoção máxima atingiu 18,9%. Sua presença também está associada à microclina, mineral pertencente ao grupo dos feldspatos potássicos, conforme descrito por Silva *et al.* (2006) e Bragagnolo *et al.* (2025). Nessa estrutura, o potássio encontra-se fortemente incorporado à rede aluminosilicática, o que limita sua extração pelo agente lixiviante, como também indicado por Freitas (2026). Dessa forma, a remoção inicial ocorre nas regiões mais acessíveis do mineral, enquanto o potássio localizado no interior das partículas permanece protegido pela estrutura cristalina. Como o ácido nítrico possui capacidade limitada de desestruturação dessa rede, a eficiência de remoção torna-se restrita ao longo do processo.

Portanto, os resultados indicam que 60 minutos representam a condição mais favorável para a remoção simultânea das impurezas contendo ferro, potássio e alumínio nas condições estudadas, correspondendo ao ponto em que a eficiência da lixiviação com ácido nítrico é maximizada.

### *5.2.2 Efeito do tempo de lixiviação utilizando mistura ácida: resíduo in natura*

Assim como na condição anteriormente avaliada, a amostra submetida à lixiviação neste estudo corresponde ao resíduo na condição como recebida. A Figura 19 apresenta as amostras obtidas após a lixiviação utilizando a mistura ácida composta pelos ácidos nítrico, sulfúrico e clorídrico, considerando os quatro tempos de tratamento investigados, conforme descrito por Cubi *et al.* (2026).

Diferentemente das amostras lixiviadas somente com ácido nítrico, as amostras submetidas à mistura ácida apresentaram um clareamento mais acentuado ao longo do processo de lixiviação. Observa-se que, com exceção da amostra tratada por 15 minutos, as demais apresentaram coloração visualmente próxima entre si, indicando que a maior parte das impurezas responsáveis pela coloração do material foi removida nos estágios iniciais da reação, conforme discutido por Long *et al.* (2025).

A alteração observada na coloração do resíduo está associada, principalmente, à remoção dos compostos ferríferos presentes na superfície das partículas, os quais atuam como importantes centros de cor, conforme descrito por Khalifa *et al.* (2019). Dessa forma, o intenso clareamento verificado nas amostras sugere uma remoção mais eficiente dessas espécies ao longo do processo de lixiviação, em concordância com Long *et al.* (2025).

**Figura 19 - Amostras de resíduo após o processo de lixiviação com mistura ácida**

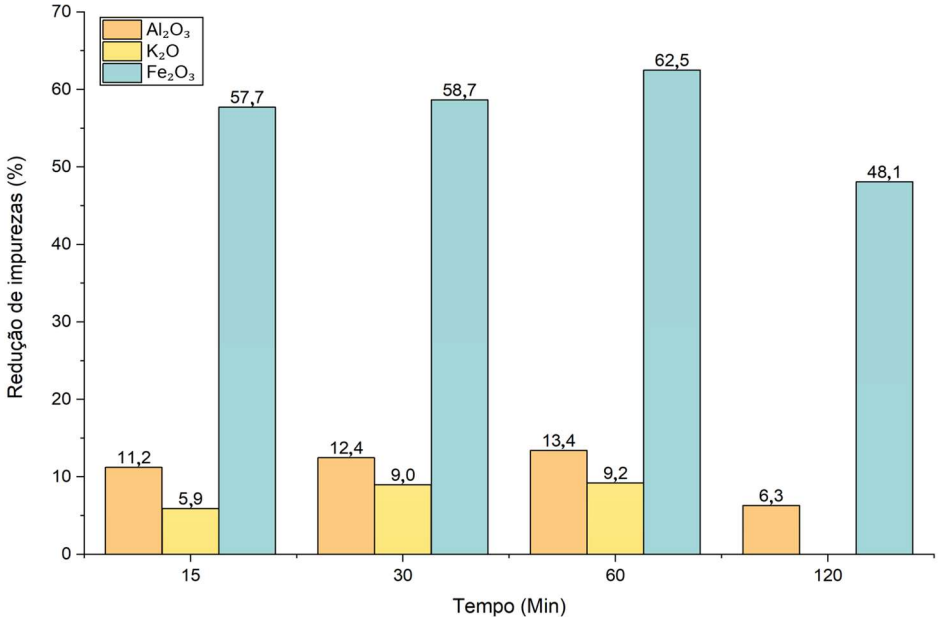



Fonte: Própria autora (2026)

A análise visual, por sua vez, apresenta limitações quanto à avaliação da remoção de elementos como alumínio e potássio, uma vez que esses constituintes não influenciam diretamente a coloração do resíduo, conforme descrito por Freitas (2026). Além disso, a semelhança observada entre as amostras tratadas por 30, 60 e 120 minutos não permite a identificação de uma condição ótima de lixiviação por meio da análise macroscópica. A partir dessa avaliação, é possível apenas inferir que o tempo de 15 minutos foi insuficiente para promover o mesmo nível de purificação observado nos demais tratamentos.

A Figura 20 apresenta os percentuais de redução das principais impurezas presentes no resíduo após o processo de lixiviação com a mistura ácida, determinados por FRX. Os resultados evidenciam que a eficiência da lixiviação com a mistura ácida aumentou ao longo do processo até determinado período de reação, comportamento favorecido pela sinergia química entre os ácidos clorídrico, sulfúrico e nítrico na dissolução de fases minerais complexas, conforme descrito por Cubi *et al.* (2026) e Freitas (2026). De maneira geral, observa-se um incremento nas taxas de remoção dos óxidos avaliados entre 15 e 60 minutos, indicando maior eficiência do processo nesse intervalo. Em contrapartida, aos 120 minutos, verifica-se uma redução no desempenho da lixiviação, conforme discutido por Long *et al.* (2025) e Freitas (2026).

**Figura 20 - Redução de impurezas após o processo de lixiviação com mistura ácida**




Fonte: Própria autora (2026).

Esse comportamento está associado à ação combinada dos ácidos presentes na solução lixiviante. Conforme discutido por Cubi *et al.* (2026), o ácido nítrico atua como agente fortemente oxidante, favorecendo a oxidação de espécies ferrosas e contribuindo para a solubilização de fases ferríferas. Segundo Long *et al.* (2025) e Maltrana e Morales (2023), o ácido clorídrico promove a complexação de íons metálicos em solução, especialmente do ferro, aumentando sua estabilidade no meio líquido e reduzindo a tendência de reprecipitação. Já o ácido sulfúrico, conforme descrito por Long *et al.* (2025), contribui para a manutenção de um meio altamente ácido, favorecendo a ruptura de ligações metal–oxigênio e intensificando a dissolução das fases minerais mais reativas. Como resultado, observa-se uma elevada remoção de impurezas nos tempos iniciais de lixiviação, principalmente entre 15 e 60 minutos.

Entretanto, o prolongamento do tratamento para 120 minutos não resulta em ganhos adicionais na remoção das impurezas. Nessa condição, as espécies mais facilmente solubilizáveis já foram amplamente removidas, enquanto as impurezas remanescentes tendem a permanecer em regiões menos acessíveis da estrutura mineral, como discutido por Long *et al.* (2025). Além disso, a dissolução parcial de fases silicatadas pode favorecer a formação de produtos secundários na interface sólido-líquido, dificultando o transporte de massa e reduzindo o contato da solução lixiviante com os sítios reativos ainda disponíveis, o que contribui para a redução da eficiência observada nesse tempo de reação.

Adicionalmente, Zueva *et al.* (2025) sugerem que a dissolução de pequenas quantidades de sílica pode promover a formação de hidrossóis ou géis coloidais na interface sólido-líquido,

favorecendo a adsorção ou reprecipitação localizada de espécies metálicas previamente dissolvidas. Segundo Zueva *et al.* (2025) e Iler (1979), esse fenômeno pode contribuir para a retenção de íons metálicos na fase sólida e para a redução aparente da eficiência de remoção observada após tempos prolongados de lixiviação.

Entre os elementos avaliados, o ferro apresentou o maior percentual de remoção, atingindo 62,5% aos 60 minutos, evidenciando a elevada eficiência da mistura ácida na dissolução das fases ferríferas presentes no resíduo. Esse comportamento está relacionado à facilidade de oxidação do ferro e à estabilização das espécies dissolvidas em solução, favorecida pela ação conjunta dos ácidos presentes no sistema lixiviante, segundo Long *et al*. (2025)

Em contrapartida, os resultados obtidos para o alumínio e o potássio indicam que esses elementos permanecem predominantemente incorporados à estrutura dos aluminossilicatos, especialmente da microclina identificada por DRX. Em função da elevada estabilidade dessas fases minerais, a ação da mistura ácida ocorre preferencialmente nas regiões superficiais das partículas, sem promover uma dissolução significativa da estrutura cristalina, como discutido por Long *et al.* (2025) e Cubi *et al.* (2026).

Ao se comparar os resultados obtidos aos 30 e 60 minutos, observa-se que o aumento da eficiência de remoção é relativamente pequeno para todos os óxidos avaliados. Para o ferro, a variação foi de aproximadamente 3,8%, enquanto para o alumínio e o potássio os incrementos foram inferiores a 1%. Esse comportamento sugere que, após 30 minutos de reação, grande parte das espécies mais reativas já foi removida, reduzindo o efeito do aumento do tempo de lixiviação sobre a eficiência do processo, conforme observado por Risfaheri *et al.* (2026) e Long *et al.* (2025).

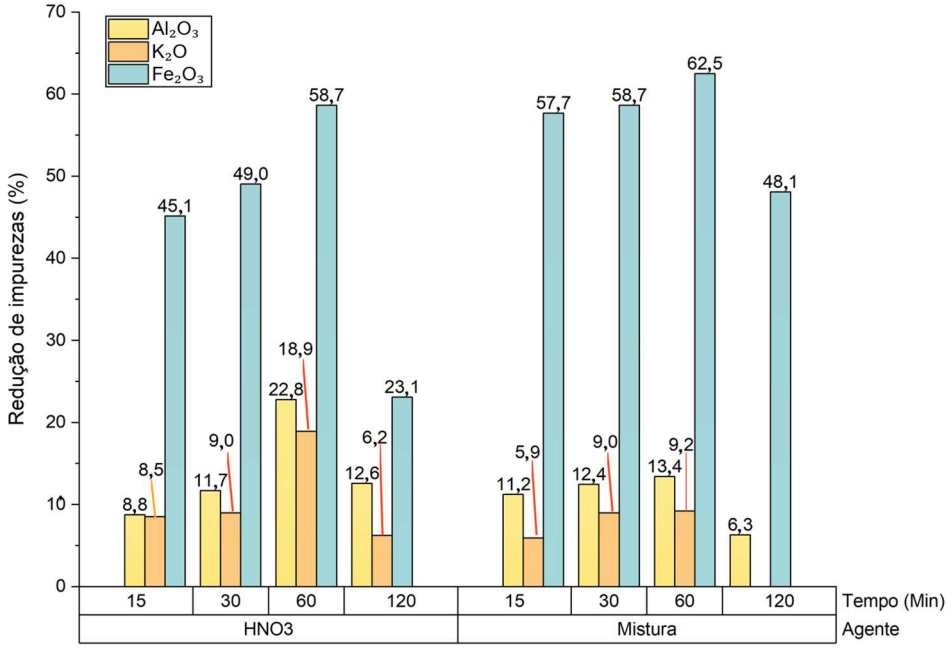
Dessa forma, embora o maior percentual de remoção tenha sido obtido aos 60 minutos, a análise dos resultados indica que 30 minutos representam uma condição adequada de operação, uma vez que proporcionam elevada remoção inicial das impurezas, enquanto os ganhos obtidos com o prolongamento da lixiviação são relativamente reduzidos.

### *5.2.3 Comparação entre os agentes lixiviantes: resíduo in natura*

Na Figura 21 é apresentado um gráfico comparativo do percentual de redução de impurezas do resíduo utilizando ácido nítrico e mistura ácida, para os quatro tempos de tratamento avaliados. De maneira geral, observa-se um comportamento semelhante ao reportado por Long *et al.* (2025). Tanto para o ácido nítrico quanto para a mistura ácida, verifica-se um aumento da eficiência de remoção nos tempos iniciais de lixiviação, seguido

pela redução dos ganhos obtidos com o aumento do tempo de reação. Esse comportamento sugere que a maior parte das impurezas mais reativas é removida nas etapas iniciais do processo, enquanto as espécies remanescentes tornam-se progressivamente menos acessíveis à ação da solução lixiviante.

**Figura 21 - Comparativo da redução de impurezas dos agentes lixiviantes analisados**




Fonte: Própria autora (2026).

À medida que o processo avança, a disponibilidade dessas espécies superficialmente expostas diminui, reduzindo a eficiência do aumento do tempo de reação. Esse comportamento está associado à dificuldade de acesso das soluções lixiviantes às impurezas presentes em regiões internas da matriz mineral, especialmente aquelas encapsuladas por fases ricas em sílica, conforme discutido por Long *et al.* (2025), Risfaheri *et al.* (2026) e Cubi *et al.* (2026). Dessa forma, tanto para o ácido nítrico quanto para a mistura ácida, observa-se que o prolongamento do tempo de lixiviação resulta em ganhos progressivamente menores na remoção das impurezas, evidenciando a existência de um limite prático de eficiência para o processo.

Esse comportamento ocorre porque, diferentemente das soluções à base de ácido fluorídrico (HF) reportadas por Iler (1979), os agentes lixiviantes utilizados neste estudo não possuem capacidade de romper as ligações da rede de sílica, que apresentam elevada estabilidade química. Dessa forma, a lixiviação ocorre preferencialmente sobre as impurezas presentes na superfície das partículas ou em regiões acessíveis da estrutura mineral, conforme

descrito por Iler (1979) e corroborado por Xie *et al.* (2023). Os resultados obtidos indicam que esses agentes são eficientes na remoção das espécies mais reativas, permitindo identificar o limite de extração alcançável sem promover alterações significativas na estrutura da sílica, em concordância com as observações de Long *et al.* (2025).

A preservação da estrutura da sílica representa uma característica vantajosa do processo, uma vez que permite a remoção seletiva das impurezas sem promover a degradação significativa da matriz mineral. Entretanto, essa mesma estabilidade limita a extração de espécies localizadas em regiões internas dos grãos ou encapsuladas pela rede silicatada, em concordância com os mecanismos descritos por Iler (1979). Dessa forma, os resultados sugerem que, após determinado tempo de reação, o processo atinge uma condição próxima ao seu limite de eficiência, tornando os ganhos adicionais de remoção progressivamente menores, comportamento também observado por Risfaheri *et al.* (2026).

Comparando a eficiência de remoção das espécies individuais, observa-se que o ferro apresentou os maiores percentuais de extração para ambos os sistemas lixiviantes avaliados. Para o ácido nítrico, a remoção de $Fe_2O_3$ aumentou de 45,1% aos 15 minutos para 58,7% aos 60 minutos. Já para a mistura ácida, a remoção atingiu 57,7% aos 15 minutos e alcançou o valor máximo de 62,5% aos 60 minutos, evidenciando maior capacidade desse sistema na dissolução das fases ferríferas presentes no resíduo, conforme também reportado por Cubi *et al. (*2026).

Esse resultado está associado ao mecanismo de lixiviação por reação química, amplamente discutido por Long *et al.* (2025), no qual a dissolução das fases ferríferas é controlada pela ruptura das ligações químicas entre o ferro e a matriz mineral. Devido à elevada estabilidade dessas ligações, a remoção do ferro requer condições termodinamicamente favoráveis para que a reação ocorra de forma eficiente. Nesse contexto, a presença simultânea dos ácidos clorídrico e sulfúrico contribui para a redução do pH do sistema e para a estabilização dos íons metálicos em solução, favorecendo a ruptura das ligações metal–oxigênio e resultando em percentuais de extração superiores aos obtidos com o ácido nítrico isolado, conforme discutido por Maltrana e Morales (2023) e Cubi *et al.* (2026).

O alumínio e o potássio apresentaram remoção predominantemente controlada por mecanismo difusional (Long *et al.,* 2025). Nessa condição, o desempenho da lixiviação depende da capacidade do agente lixiviante de penetrar nas microfissuras e regiões internas da estrutura mineral para alcançar as espécies reativas, conforme descrito por Kuwahara e Aoki (1995) e Souza *et al.* (2007). Para esses elementos, o ácido nítrico apresentou os maiores percentuais de remoção, atingindo aproximadamente 10,6% para $Al_2O_3$ e 17,6% para $K_2O$ aos 60 minutos, enquanto a mistura ácida alcançou valores próximos de 8,4% e 16,5%, respectivamente.

Os processos controlados por difusão interna são fortemente influenciados pelas condições de transporte de massa no interior das partículas. Nesse contexto, a elevada seletividade do ácido nítrico em relação à sílica favorece a remoção dos cátions metálicos sem promover alterações significativas na matriz silicatada, mantendo acessíveis os caminhos necessários para a difusão. Em contrapartida, a mistura ácida concentra sua ação na dissolução das fases ferríferas superficiais e pode favorecer a formação de produtos secundários na interface sólido-líquido, dificultando o transporte de massa em microfissuras e regiões mais profundas do material, conforme relatado por Risfaheri *et al.* (2026) e Zueva *et al.* (2025).

Como consequência, os caminhos de difusão tornam-se progressivamente menos acessíveis, limitando a extração de espécies associadas aos aluminossilicatos. Esse comportamento está de acordo com as observações de Long *et al.* (2025), que relatam a redução da eficiência de remoção quando as impurezas se encontram encapsuladas pela matriz silicatada. Dessa forma, enquanto a mistura ácida apresenta maior eficiência na remoção do ferro, o ácido nítrico se mostra mais eficiente para a extração de $Al_2O_3$ e $K_2O$, favorecendo o acesso às regiões internas dos grãos minerais e a mobilização das espécies dissolvidas, em concordância com as observações de Cubi *et al.* (2026) e com os resultados obtidos por Freitas (2026).

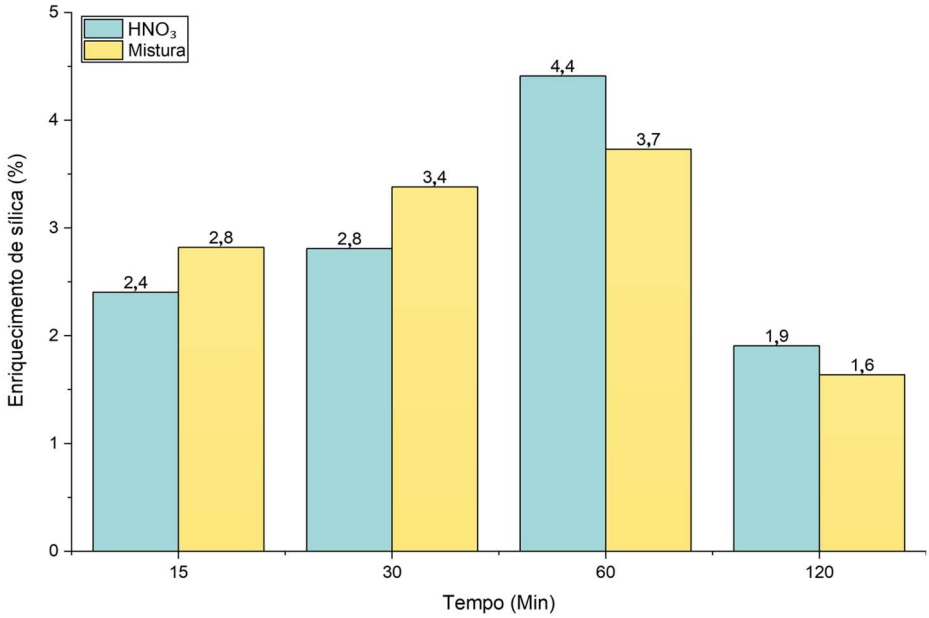
Após a avaliação da capacidade de remoção das principais impurezas presentes no resíduo pelos diferentes agentes lixiviantes, foi possível verificar, por meio da análise química por FRX, um enriquecimento do teor de sílica no material tratado. Esse aumento não está associado à geração de nova sílica, mas sim à remoção seletiva dos óxidos contaminantes presentes no resíduo, promovendo um aumento relativo da concentração de $SiO_2$ na composição química do material.

A variação do teor de sílica em função do tempo de lixiviação para os dois sistemas avaliados é apresentada na Figura 22. De maneira geral, observa-se um aumento progressivo do enriquecimento de sílica entre 15 e 60 minutos de reação, seguido por uma redução aos 120 minutos. Esse comportamento acompanha a tendência observada para a remoção das impurezas discutidas anteriormente, indicando que o enriquecimento de $SiO_2$ está diretamente relacionado à extração de $Fe_2O_3$, $Al_2O_3$ e $K_2O$ presentes no resíduo.

Os resultados demonstram que o maior enriquecimento de sílica foi obtido utilizando ácido nítrico durante 60 minutos de lixiviação, alcançando um aumento de 4,4% no teor de $SiO_2$. Para a mistura ácida, o valor máximo observado foi de 3,7% no mesmo tempo de reação. Esse desempenho superior do ácido nítrico está associado à sua maior eficiência na remoção de $Al_2O_3$ e $K_2O$, promovendo uma redução mais expressiva da fração de impurezas e,

consequentemente, um aumento mais significativo da concentração relativa de sílica no material. Dessa forma, os resultados reforçam que a eficiência de enriquecimento da sílica está diretamente vinculada à capacidade de cada sistema lixiviante em remover seletivamente os constituintes não silicosos da matriz mineral.

**Figura 22 - Percentual de enriquecimento de sílica após o processo de lixiviação**




Fonte: Própria autora (2026).

Ao se avaliar os resultados da mistura ácida, verifica-se que a condição de 30 minutos apresenta uma relação mais favorável entre desempenho e tempo de processamento. Nessa condição, o enriquecimento de sílica atingiu 3,4%, enquanto aos 60 minutos foi observado um valor de 3,7%, correspondendo a uma diferença de apenas 0,3%. Além disso, conforme discutido anteriormente, os ganhos de remoção das principais impurezas entre esses dois tempos foram pouco expressivos, indicando que grande parte das espécies suscetíveis à lixiviação já havia sido removida nos estágios iniciais do processo.

Dessa forma, para a mistura ácida, o prolongamento da lixiviação de 30 para 60 minutos promove apenas um ganho marginal no enriquecimento de sílica, não justificando o aumento do tempo de operação. Assim, o tempo de 30 minutos pode ser considerado a condição mais adequada do ponto de vista técnico e operacional para esse sistema lixiviante.

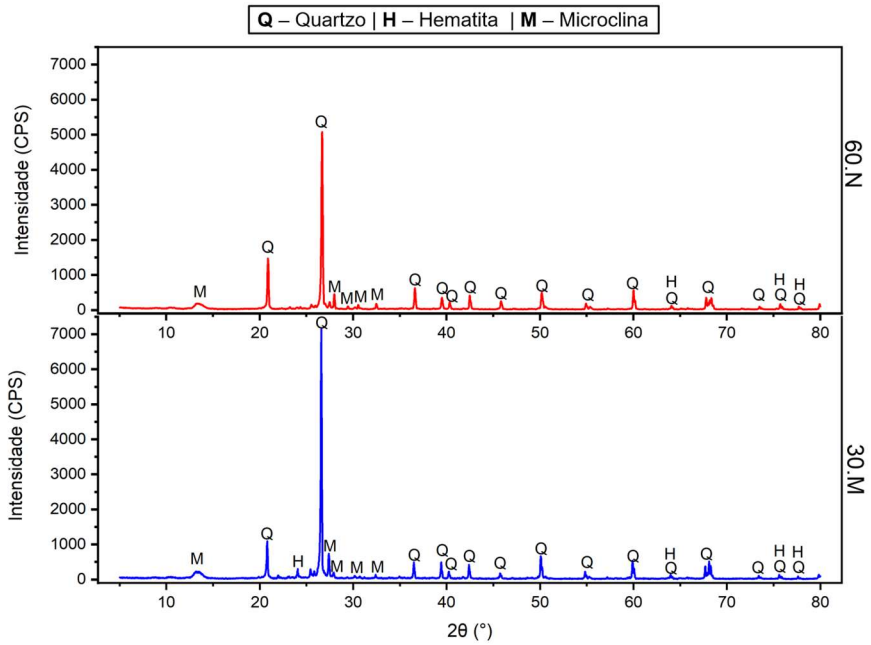
Por outro lado, para a solução de ácido nítrico, o aumento do tempo de reação até 60 minutos promoveu ganhos significativos tanto na remoção das impurezas quanto no enriquecimento de sílica, resultando no maior valor obtido neste estudo. Dessa forma, a

condição de 60 minutos pode ser considerada a mais adequada para o sistema nítrico, por proporcionar o maior nível de purificação do material.

A Figura 23 apresenta os difratogramas de raios X das amostras submetidas às condições consideradas mais adequadas para cada sistema lixiviante: 30 minutos de lixiviação com a mistura ácida (30.M) e 60 minutos de lixiviação com ácido nítrico (60.N). Essa análise visa avaliar a influência da lixiviação sobre as fases cristalinas do resíduo e verificar se o aumento do teor de sílica ocorreu sem alterações significativas na estrutura mineral do material.

Em ambas as condições, observa-se a predominância do quartzo ($SiO_2$), identificado pelos intensos picos de difração em aproximadamente 20,8°, 26,6° e 50,1° (2θ), reflexões cristalográficas características dessa fase mineral. A manutenção dessas reflexões cristalográficas após os tratamentos indica que os agentes lixiviantes empregados não promoveram modificações relevantes na estrutura da fase quartzosa. Esse comportamento está associado à elevada estabilidade das ligações Si–O–Si que compõem a rede cristalina do quartzo, tornando essa fase altamente resistente ao ataque químico dos ácidos utilizados, conforme descrito por Iler (1979) e corroborado por Long *et al.* (2025). Além disso, a ausência de evidências significativas de amorfização confirma que os tratamentos não promoveram alterações estruturais relevantes na matriz silicosa, resultado compatível com as observações de Niu *et al.* (2020).

**Figura 23 - Composição mineralógica das amostras 60.N e 30.M**




Fonte: Própria autora (2026).

Embora a mistura ácida tenha apresentado maior eficiência na remoção de ferro, os difratogramas ainda evidenciam reflexões atribuídas à hematita ($\alpha$-$Fe_2O_3$), resultado também observado nos experimentos de Freitas (2026). Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que, durante a dissolução das fases ferríferas, parte dos íons $Fe^{3+}$ solubilizados permanece adsorvida na superfície das partículas ou sofre reprecipitação localizada durante as etapas de lixiviação e secagem, fenômeno descrito por Carmignano *et al.* (2021) em sistemas ácidos. Adicionalmente, Zueva *et al.* (2025) explicam que a interação eletrostática entre espécies de ferro e superfícies de sílica pode favorecer a retenção desses íons na fase sólida, dificultando sua completa remoção.

Na amostra tratada com ácido nítrico por 60 minutos, observam-se reflexões mais definidas associadas à microclina ($KAlSi_3O_8$), fase pertencente ao grupo dos feldspatos potássicos, conforme caracterizado por Silva *et al.* (2006) em resíduos silicáticos do Quadrilátero Ferrífero. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada seletividade do $HNO_3$ em relação à sílica e à sua menor tendência de promover a formação de barreiras superficiais durante a lixiviação, conforme discutido por Okada *et al.* (2002) e Härkönen e Keiski (1984). Dessa forma, os caminhos de difusão permanecem mais acessíveis, o que está de acordo com os mecanismos descritos por Kuwahara e Aoki (1995), favorecendo a extração de espécies associadas aos aluminossilicatos sem comprometer a estrutura cristalina dessas fases. A remoção parcial de alumínio e potássio, associada à diminuição de impurezas superficiais, contribui para uma melhor definição dos picos remanescentes, tornando mais evidente a presença da microclina no difratograma.

De modo geral, os resultados de DRX indicam que os tratamentos lixiviantes não promoveram alterações mineralógicas significativas no resíduo, mantendo o quartzo como fase predominante em ambas as condições avaliadas. A preservação dos principais picos cristalinos e a ausência de evidências de amorfização demonstram que a estrutura da sílica permaneceu estável durante o processo. Dessa forma, os resultados corroboram as análises químicas obtidas por FRX, confirmando que o enriquecimento em sílica ocorreu sem comprometer a integridade da matriz mineral original.

### *5.2.4 Efeito do pré tratamento térmico do resíduo na lixiviação*

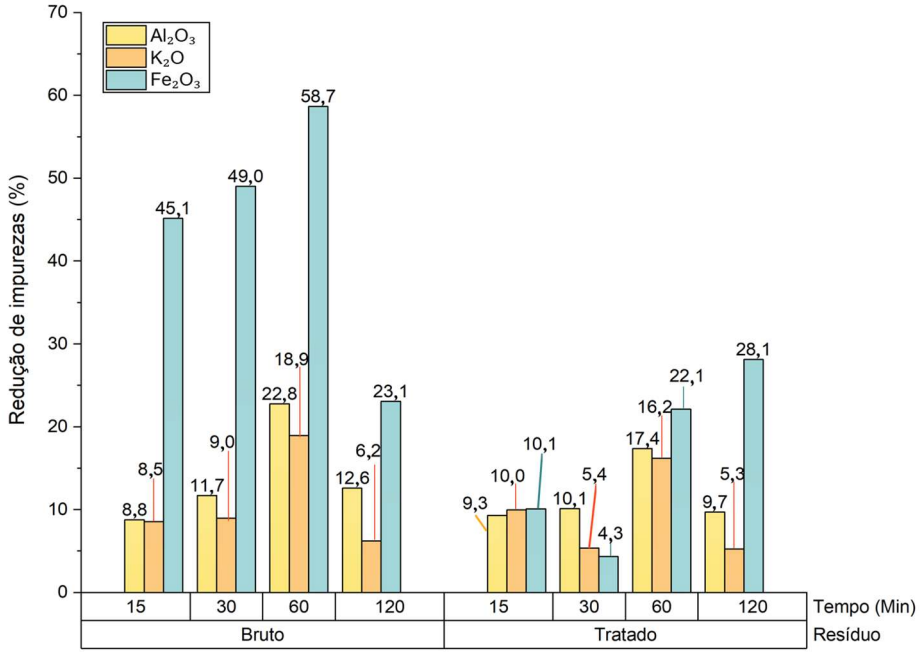
Conforme discutido anteriormente, os resultados de lixiviação indicaram a existência de um limite prático para a remoção das impurezas presentes no resíduo. Embora os agentes lixiviantes empregados tenham promovido a extração das espécies mais acessíveis, parte das

impurezas permaneceu associada a regiões internas dos grãos minerais ou encapsulada pela matriz silicatada, dificultando seu acesso pela solução lixiviante.

Nesse contexto, Cubi *et al.* (2026) demonstraram que a aplicação de um pré-tratamento térmico pode favorecer a purificação da sílica quando associado a condições mais severas de lixiviação, atribuindo esse efeito à geração de microfissuras e ao aumento da acessibilidade das impurezas aprisionadas na matriz mineral. No presente estudo, embora alterações microestruturais semelhantes possam ter ocorrido, seus efeitos não se refletiram em aumento da eficiência de lixiviação para o sistema contendo ácido nítrico.

A Figura 24 apresenta os percentuais de redução das principais impurezas, determinados por fluorescência de raios X (FRX), para as amostras lixiviadas com ácido nítrico. Os resultados são comparados entre a amostra na condição como recebida, denominada bruto, e a amostra submetida ao pré-tratamento térmico antes da lixiviação, denominada tratada.

**Figura 24 - Efeito do pré-tratamento térmico na remoção de impurezas por lixiviação em ácido nítrico**




Fonte: Própria autora (2026).

Os resultados apresentados na Figura 24 indicam que o pré-tratamento térmico não promoveu o aumento da eficiência de lixiviação esperado para o sistema utilizando ácido nítrico. Em comparação com a amostra bruta, a amostra tratada termicamente apresentou menores percentuais de remoção para todas as impurezas avaliadas. A redução foi particularmente expressiva para o $Fe_2O_3$, cuja remoção máxima diminuiu de 58,7% para 28,1%, resultado também consistente com os dados experimentais de Freitas (2026). Para o $Al_2O_3$ e o

$K_2O$, as reduções foram menos pronunciadas, passando de 22,8% para 17,4% e de 18,9% para 16,2%, respectivamente. Além disso, as maiores remoções de alumínio e potássio ocorreram em aproximadamente 60 min de lixiviação, enquanto a remoção de ferro continuou aumentando até 120 min, comportamento coerente com a distinção entre mecanismos de reação química e difusão descritos por Long *et al.* (2025).

Esse comportamento difere parcialmente dos resultados reportados por Cubi *et al.* (2026), que observaram aumento da eficiência de purificação da sílica após a aplicação de um pré-tratamento térmico seguido de lixiviação em mistura ácida durante 8 h a 80 °C. Segundo os autores, o aquecimento promove a formação de microfissuras decorrentes das diferenças de expansão térmica entre quartzo e hematita e da transformação alotrópica α→β do quartzo, fenômeno também fundamentado por Johnson *et al.* (2021), o que aumenta a acessibilidade das impurezas localizadas em regiões internas das partículas.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que essas alterações microestruturais também ocorreram no material analisado. As reduções relativamente pequenas observadas para $Al_2O_3$ e $K_2O$ indicam que os mecanismos difusionais continuaram atuando após o tratamento térmico, evidenciando que o aquecimento não eliminou completamente os caminhos de acesso às impurezas associadas aos aluminossilicatos, em concordância com Kuwahara e Aoki (1995). Esse comportamento indica que parte dos benefícios relacionados ao aumento da acessibilidade das partículas foi preservada, permitindo que o ácido nítrico continuasse alcançando regiões internas do material.

Entretanto, o comportamento observado para o ferro foi significativamente distinto. Diferentemente do alumínio e do potássio, cuja remoção é fortemente influenciada pelo acesso do lixiviante às regiões internas das partículas, a dissolução dos óxidos de ferro depende predominantemente de reações químicas na interface sólido-líquido e da ruptura de ligações Fe–O de elevada estabilidade, conforme descrito por Long *et al.* (2025). Nessa condição, o aumento da acessibilidade promovido pelo tratamento térmico não é suficiente para garantir maior extração. Além disso, o aquecimento a 800 °C pode ter promovido a estabilização estrutural das fases ferríferas remanescentes por meio de processos de transformação mineral e reorganização cristalina, como a conversão de goethita em hematita relatada por Carmignano *et al.* (2021), resultando em fases mais estáveis e menos reativas. Adicionalmente, a condensação de grupos silanóis em ligações siloxano (Si–O–Si), conforme descrito por Iler (1979), pode ter reduzido a hidrofilicidade superficial, dificultando ainda mais a interação entre o ácido nítrico e as fases ferríferas. Como consequência, embora as partículas contendo ferro

tenham se tornado mais expostas, sua dissolução passou a exigir condições mais severas do que aquelas empregadas neste estudo.

Adicionalmente, o tratamento térmico promove alterações na superfície da sílica que também podem limitar a eficiência da lixiviação. Em temperaturas próximas de 800 °C ocorre a condensação dos grupos silanóis (Si–OH), formando ligações siloxano (Si–O–Si) mais estáveis, conforme descrito por Iler (1979) e reforçado por Primeau *et al.* (1997). Esse processo reduz a hidrofilicidade da superfície, dificultando o molhamento do material e a penetração da solução lixiviante nos poros e microfissuras gerados durante o aquecimento. Dessa forma, parte dos ganhos decorrentes da criação de novas rotas de difusão pode ter sido compensada pela menor interação entre a solução aquosa e a superfície do material.

Outro aspecto importante refere-se ao comportamento cinético observado. Enquanto as remoções de $Al_2O_3$ e $K_2O$ atingiram seus maiores valores em aproximadamente 60 min, a remoção de $Fe_2O_3$ continuou aumentando até o maior tempo avaliado. Esse resultado indica que a dissolução das fases ferríferas é mais lenta e que o sistema ainda não havia atingido o equilíbrio ao final dos ensaios, comportamento coerente com o modelo cinético de reação química e difusão descrito por Long *et al.* (2025).

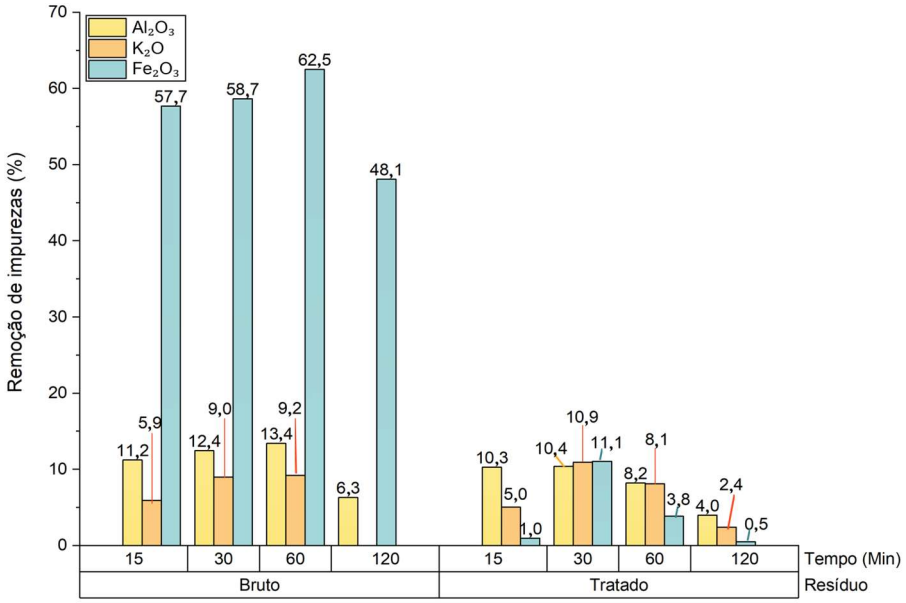
Nesse contexto, a diferença em relação ao trabalho de Cubi *et al.* (2026) torna-se particularmente relevante. Embora o presente estudo tenha adotado o mesmo conceito de pré-tratamento térmico, os autores realizaram a lixiviação por 8 h a 80 °C utilizando uma mistura ácida mais agressiva, composta por HCl, $H_2SO_4$ e $HNO_3$ na proporção 4:3:1, enquanto neste trabalho foi empregado apenas $HNO_3$ e tempos máximos de 120 min. Assim, é possível que os benefícios associados à formação de microfissuras, descritos por Qu *et al.* (2024), somente se manifestem plenamente quando combinados com condições capazes de promover a dissolução efetiva das fases expostas. Os resultados obtidos sugerem que, nas condições avaliadas, o tempo de reação e a capacidade química do sistema lixiviante não foram suficientes para superar a maior resistência das fases ferríferas após o tratamento térmico.

De modo geral, os resultados indicam que o pré-tratamento térmico produziu efeitos antagônicos sobre a lixiviação. Embora a geração de microfissuras tenha favorecido a acessibilidade das impurezas associadas aos aluminossilicatos, as alterações estruturais das fases ferríferas e a redução da hidrofilicidade da superfície, associadas à condensação de grupos silanóis conforme Iler (1979) e Primeau *et al.* (1997), limitaram a remoção de ferro. Além disso, a estabilização das fases ferríferas durante o aquecimento pode ter contribuído para sua menor reatividade, conforme discutido por Freitas (2026). Assim, nas condições avaliadas, os efeitos

desfavoráveis do aquecimento prevaleceram, resultando em menor eficiência global de lixiviação quando comparado ao material sem tratamento térmico.

Considerando que o ácido nítrico apresentou limitações na dissolução das fases ferríferas após o tratamento térmico, avaliou-se também o efeito do aquecimento quando empregado um sistema lixiviante mais agressivo, composto pela mistura de HCl, $H_2SO_4$ e $HNO_3$. Nesse contexto, a Figura 25 apresenta os percentuais de redução das principais impurezas determinados por FRX para as amostras bruta e tratada submetidas à lixiviação nessa condição, conforme metodologia adotada por Freitas (2026) e composição da mistura descrita por Cubi *et al.* (2026), permitindo a comparação direta do efeito do pré-tratamento térmico em um sistema químico mais severo.

**Figura 25 - Efeito do pré-tratamento térmico na remoção de impurezas por lixiviação em mistura ácida**




Fonte: Própria autora (2026).

Os resultados apresentados na Figura 25, obtidos para o sistema de mistura ácida, indicam que, mesmo sob condições de lixiviação mais agressivas, o pré-tratamento térmico não promoveu os benefícios esperados na eficiência de remoção das impurezas. Em comparação com a amostra bruta, o material tratado apresentou reduções significativamente menores para todas as espécies avaliadas, sendo o efeito mais pronunciado para o ferro. Enquanto a amostra sem tratamento térmico atingiu remoção máxima de $Fe_2O_3$ de 62,5%, a amostra tratada apresentou apenas 3,8% aos 60 min de lixiviação, evidenciando que o aquecimento prévio comprometeu significativamente a atuação do sistema lixiviante. Esse comportamento é consistente com o fenômeno de passivação superficial e formação de gel de sílica descrito por

Zueva *et al*. (2025) e Risfaheri *et al*. (2026), que limita o acesso do lixiviante às regiões internas do material mesmo em sistemas de maior agressividade química.

Esse comportamento torna-se particularmente relevante quando comparado aos resultados obtidos com $HNO_3$. Embora o tratamento térmico também tenha reduzido a eficiência de remoção no sistema contendo apenas ácido nítrico, a queda observada para a mistura ácida foi substancialmente mais intensa, especialmente para o ferro, conforme relatado por Freitas (2026). Esse resultado sugere que, além dos efeitos já discutidos para o material aquecido, a interação entre a superfície modificada termicamente e os componentes da mistura ácida introduziu limitações adicionais ao processo.

Uma possível explicação está relacionada à presença de $H_2SO_4$ no sistema lixiviante. Em meios contendo ácido sulfúrico, a dissolução parcial de espécies silicatadas pode favorecer a formação de hidrossóis e géis de sílica na interface sólido-líquido, conforme descrito por Zueva *et al.* (2025). Como o tratamento térmico aumenta a quantidade de superfícies expostas, poros e microfissuras, esses produtos podem se formar preferencialmente nessas regiões, recobrindo ou bloqueando parcialmente os caminhos de difusão criados pelo aquecimento. Dessa forma, as mesmas microfissuras que, teoricamente, deveriam facilitar o acesso do lixiviante às impurezas passam a atuar como regiões propícias ao acúmulo de produtos de reação, reduzindo a eficiência do transporte de massa, conforme Cubi *et al.* (2026).

O efeito foi menos pronunciado para $Al_2O_3$ e $K_2O$, indicando que os mecanismos difusionais associados à remoção dessas espécies continuaram atuando em certa medida. Entretanto, mesmo nesses casos, observa-se redução da eficiência em relação à amostra bruta, sugerindo que os benefícios decorrentes do aumento da acessibilidade das partículas foram parcialmente compensados pela formação de barreiras ao transporte de massa, conforme descrito por Kuwahara e Aoki (1995) e Cubi *et al.* (2026).

Outro aspecto relevante refere-se ao comportamento temporal do sistema. Os resultados obtidos indicam que, após aproximadamente 30 min de lixiviação, há uma redução progressiva dos percentuais de remoção para a maioria das espécies avaliadas no sistema contendo mistura ácida, tanto para a amostra bruta quanto para a tratada, conforme observado por Cubi *et al.* (2026). Esse comportamento sugere que a etapa inicial do processo concentra a maior fração de extração efetiva, sendo seguida por uma perda de eficiência com o avanço do tempo de reação.

Nesse contexto, a diminuição observada não está associada à limitação cinética de dissolução das fases ferríferas, mas sim a fenômenos interfaciais que passam a predominar em tempos mais elevados. A formação progressiva de produtos ricos em sílica na interface sólido-

líquido, possivelmente na forma de espécies coloidais, pode reduzir a permeabilidade do sistema e dificultar o contato contínuo entre o lixiviante e as superfícies reativas, conforme Zueva *et al.* (2025). Esse efeito é particularmente relevante em sistemas contendo $H_2SO_4$, nos quais a instabilidade de espécies silicatadas favorece a formação de estruturas que atuam como barreiras difusionais, conforme Iler (1979).

Adicionalmente, a retenção de espécies metálicas dissolvidas por mecanismos de adsorção em superfícies coloidais pode contribuir para a redução aparente da eficiência de remoção ao longo do tempo, conforme Zueva *et al.* (2025) e Iler (1979). Dessa forma, parte dos íons liberados inicialmente pode permanecer associada ao resíduo sólido durante as etapas finais do processo, influenciando diretamente os resultados determinados por FRX, conforme Freitas (2026).

Portanto, o comportamento observado indica que o desempenho da mistura ácida é fortemente dependente do estágio inicial da lixiviação, no qual predominam os mecanismos de dissolução superficial. Com o avanço do tempo, processos de passivação interfacial e retenção de espécies tornam-se mais relevantes, reduzindo a eficiência global do sistema nas condições avaliadas.

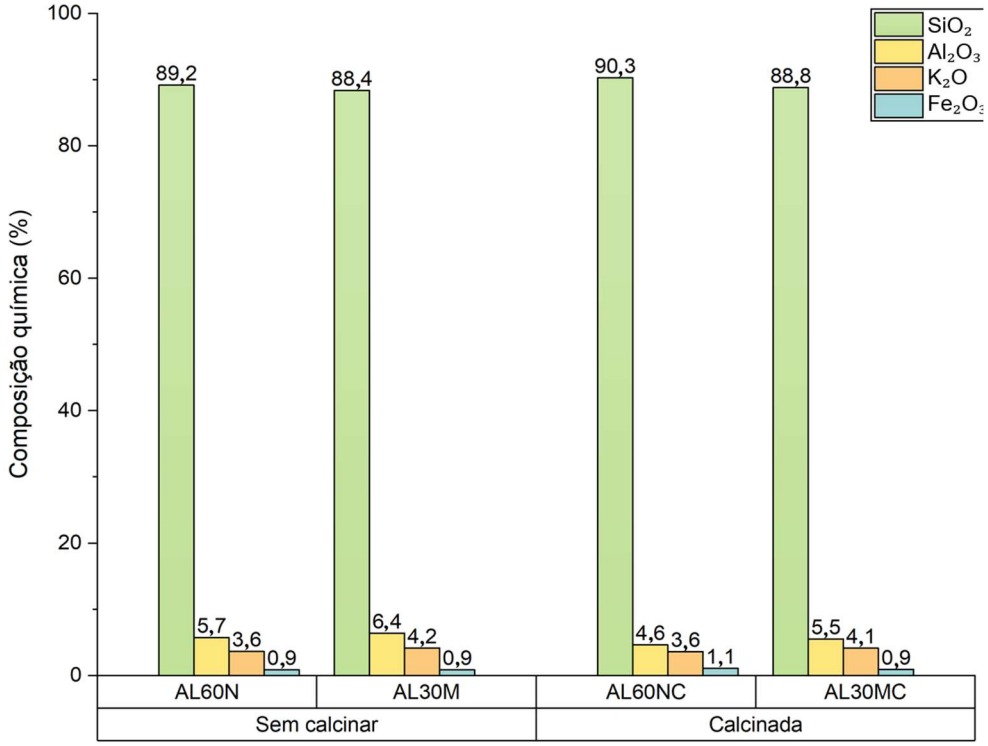
## 5.3 Calcinação

Após a etapa de lixiviação ácida, a calcinação é frequentemente empregada como um tratamento complementar com o objetivo de promover alterações estruturais e químicas que podem contribuir para o aumento da pureza e da estabilidade da sílica obtida, conforme discutido por Freitas (2026). Embora a lixiviação seja eficiente na remoção de impurezas metálicas presentes na superfície e em regiões acessíveis da matriz mineral, ainda podem permanecer espécies residuais adsorvidas, compostos voláteis e grupos hidroxila associados à estrutura do material, como descrito por Cubi *et al.* (2026) e Iler (1979).

Nesse contexto, o tratamento térmico atua como uma etapa de refinamento, favorecendo a eliminação dessas espécies remanescentes e promovendo a reorganização da rede silicosa por meio da condensação dos grupos silanóis superficiais e da formação de ligações siloxano mais estáveis, conforme Iler (1979) e Primeau *et al*. (1997). Além disso, a calcinação pode modificar características importantes do material, como área superficial, porosidade, energia superficial e grau de cristalinidade, propriedades diretamente relacionadas ao desempenho da sílica em aplicações tecnológicas, conforme Li *et al.* (2023) e Freitas (2026).

A fim de avaliar a influência desse tratamento térmico sobre a qualidade da sílica produzida, foram selecionadas as amostras que apresentaram os melhores resultados na etapa de lixiviação ácida. Na Figura 26 é apresentada a composição química das amostras AL60.N, correspondente ao material lixiviado com ácido nítrico durante 60 minutos, e AL30.M, referente ao material lixiviado com mistura ácida durante 30 minutos. Para ambas as condições, a composição química foi avaliada antes e após o processo de calcinação, permitindo analisar os efeitos do tratamento térmico na remoção de impurezas e na obtenção da sílica final.

**Figura 26 - Influência da calcinação na composição química das amostras lixiviadas**




Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se com a Figura 26 que ambas as amostras mantiveram elevados teores de $SiO_2$ após o tratamento térmico, com valores próximos a 90%, indicando que a composição química global do material permaneceu praticamente inalterada. Para a amostra AL60.N, o teor de $SiO_2$ passou de 89,2% para 90,3%, enquanto para a amostra AL30.M ocorreu um aumento de 88,4% para 88,8%. Embora esses resultados indiquem um leve enriquecimento da fase silicosa, as diferenças observadas são relativamente pequenas e podem estar associadas à própria incerteza analítica da técnica de fluorescência de raios X. Dessa forma, não é possível afirmar que a calcinação promoveu uma purificação química significativa do material com base apenas nos resultados de composição química.

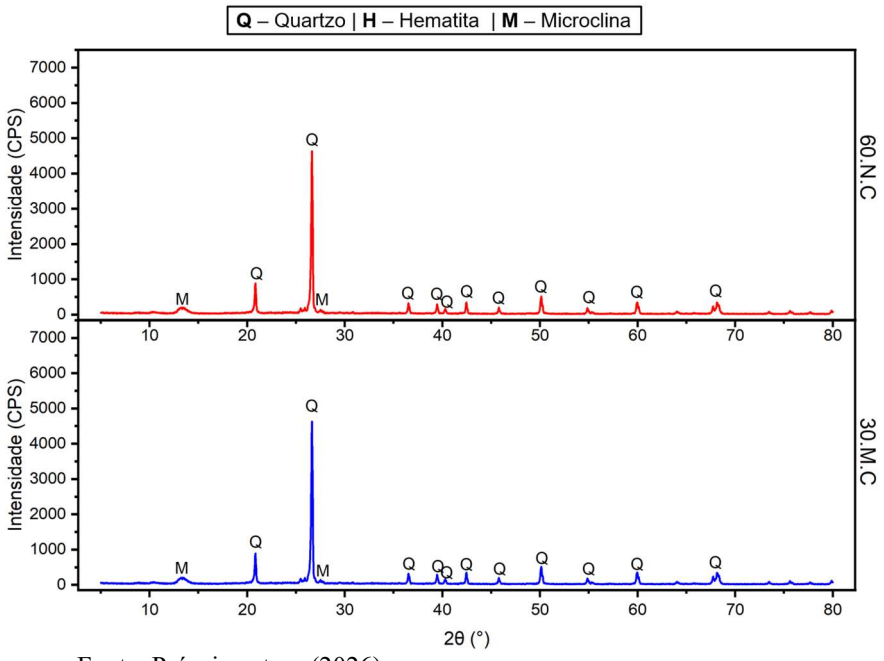
Comportamento semelhante foi observado para os teores de $K_2O$ e $Fe_2O_3$, cujas variações após a calcinação foram pouco expressivas. Os valores de $K_2O$ permaneceram praticamente constantes em ambas as amostras, enquanto o $Fe_2O_3$ apresentou apenas pequenas oscilações, compatíveis com possíveis variações experimentais associadas ao método de análise. Esses resultados indicam que a calcinação não promoveu remoção significativa dessas impurezas remanescentes.

A alteração mais evidente foi observada para o teor de $Al_2O_3$. Na amostra AL60.N, o conteúdo de alumina reduziu de 5,7% para 4,6%, enquanto na amostra AL30.M houve redução de 6,4% para 5,5%. Esse comportamento sugere que parte das fases contendo alumínio pode ter sofrido transformações durante o tratamento térmico, contribuindo para uma diminuição relativa da sua concentração, conforme Xie *et al.* (2023). Entretanto, mesmo nesse caso, a redução observada foi moderada quando comparada às mudanças promovidas anteriormente pela etapa de lixiviação, conforme Cubi *et al.* (2026).

De modo geral, os resultados demonstram que a calcinação a 1200 °C exerceu influência limitada sobre a composição química do material, evidenciando que a principal etapa responsável pela remoção das impurezas foi a lixiviação ácida.

Na Figura 27 é apresentada a análise mineralógica das amostras AL60.N e AL30.M antes e após a calcinação, permitindo avaliar as possíveis transformações estruturais e de fase promovidas pelo tratamento térmico.

**Figura 27 - Influência da calcinação na composição mineralógica das amostras lixiviadas**




Fonte: Própria autora (2026).

Ao comparar os difratogramas das amostras lixiviadas apresentados na Figura 23 com aqueles obtidos após a calcinação a 1200 °C por 1 hora, apresentados na Figura 27, observa-se que o quartzo permanece como a fase mineralógica predominante em todas as condições avaliadas. Os principais reflexos difratométricos, localizados em aproximadamente 20,8°, 26,6° e 50,1° (2θ), mantêm-se presentes antes e após o tratamento térmico, indicando que a calcinação não promoveu alterações significativas na composição mineralógica principal do material e preservou a predominância da fase silicosa.

Após a calcinação, nota-se uma melhor definição dos picos associados ao quartzo, evidenciando um aumento do grau de organização cristalina da estrutura. Esse comportamento pode ser atribuído ao rearranjo do retículo cristalino e ao alívio de tensões internas geradas durante as etapas de beneficiamento e lixiviação, conforme Cubi *et al.* (2026) e Qiu *et al.* (2025). Embora, conforme Xie *et al*. (2023) e Iler (1979), temperaturas da ordem de 1200 °C sejam frequentemente associadas à formação de polimorfos de alta temperatura da sílica, como tridimita e cristobalita, não foram observadas evidências conclusivas dessas transformações nos difratogramas analisados.

Esse comportamento pode ser atribuído à natureza cinética das transformações polimórficas da sílica, cujo desenvolvimento depende não apenas da temperatura, mas também da presença de mineralizadores, do grau de pureza do material e das condições termodinâmicas locais, conforme Iler (1979) e Dapiaggi *et al*. (2015). Na ausência desses fatores facilitadores, a nucleação e o crescimento de fases como tridimita e cristobalita podem ser cineticamente inibidos mesmo em temperaturas teoricamente favoráveis, resultando na preservação do quartzo como fase dominante após o tratamento térmico.

Em relação às fases secundárias, observa-se que os reflexos atribuídos à hematita tornam-se menos evidentes após a calcinação. Esse comportamento sugere uma redução da detectabilidade dessas fases cristalinas, possivelmente em decorrência da sinterização e densificação da matriz silicosa, conforme Iler (1979) e Freitas (2026). Essa interpretação é consistente com os resultados de FRX, os quais demonstraram que pequenas quantidades de ferro ainda permanecem presentes no material. Dessa forma, embora o elemento continue sendo detectado quimicamente, sua fase cristalina torna-se menos evidente por difração de raios X após o tratamento térmico.

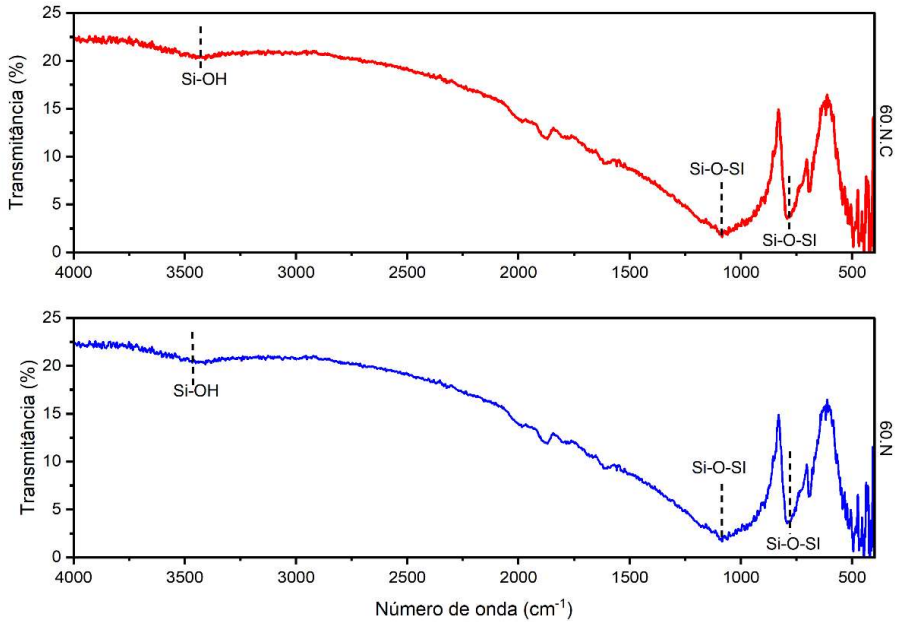
Os picos associados aos aluminossilicatos, identificados como microclina e fases micáceas, permanecem presentes mesmo após a calcinação, evidenciando a elevada estabilidade térmica desses minerais, conforme Freitas (2026) e Silva *et al.* (2006). A persistência dessas fases está de acordo com os resultados de composição química, que

mostraram apenas pequenas variações nos teores de alumina após o tratamento térmico, indicando que parte dessas impurezas minerais permaneceu incorporada à matriz do material.

Assim, os resultados demonstram que a calcinação exerceu maior influência sobre a organização estrutural e a cristalinidade da sílica do que sobre sua composição mineralógica. Enquanto a fase quartzo manteve sua estabilidade e predominância, as fases secundárias apresentaram apenas alterações discretas de intensidade.

A Figura 28 apresenta os espectros de FTIR das amostras AL60.N (Sem calcinar) e AL60.N.C (Calcinada), obtidas após lixiviação com ácido nítrico durante 60 minutos. A comparação entre os espectros permite avaliar as alterações nos grupos funcionais e na estrutura da sílica decorrentes do tratamento térmico.

**Figura 28 - Espectros de FTIR da amostra lixiviada com ácido nítrico antes e após a calcinação**




Fonte: Própria autora, 2026.

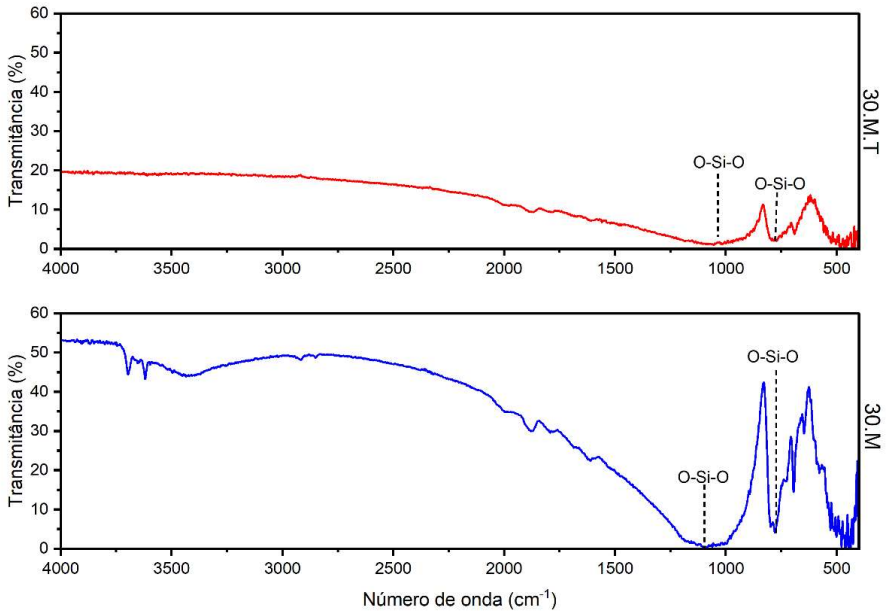
A comparação entre os espectros evidencia que a principal alteração promovida pela calcinação ocorre na região associada aos grupos hidroxila superficiais. A menor intensidade da banda próxima de 3430 $cm^{-1}$ na amostra AL60.N.C indica a redução da quantidade de grupos silanol disponíveis na superfície do material, conforme Bakar *et al.* (2016), Risfaheri *et al.* (2026) e Freitas (2026). Esse comportamento está relacionado ao fenômeno de desidroxilação, que ocorre em temperaturas elevadas, no qual grupos Si–OH vizinhos reagem entre si formando novas ligações Si–O–Si e liberando moléculas de água, conforme Iler (1979) e Li *et al.* (2023).

Além da redução dos grupos hidroxila, a calcinação favorece a reorganização estrutural da sílica, promovendo a consolidação da rede silicatada. Entretanto, as bandas características da sílica em aproximadamente 1090 e 800 $cm^{-1}$, conforme Li *et al.* (2023), Risfaheri *et al.* (2026) e Freitas (2026), permanecem praticamente inalteradas, indicando que o tratamento térmico não comprometeu a estrutura fundamental do material.

Dessa forma, os resultados de FTIR demonstram que a calcinação atuou principalmente na redução das hidroxilas superficiais e na reorganização da rede silicosa, sem provocar alterações significativas nas ligações características da sílica.

A Figura 29 apresenta os espectros de FTIR da amostra lixiviada com mistura ácida antes e após a calcinação, permitindo comparar as alterações estruturais decorrentes do tratamento térmico e a estabilidade das principais bandas da sílica.

**Figura 29 - Espectros de FTIR da amostra lixiviada com mistura ácida antes e após a calcinação**




Fonte: Própria autora (2026).

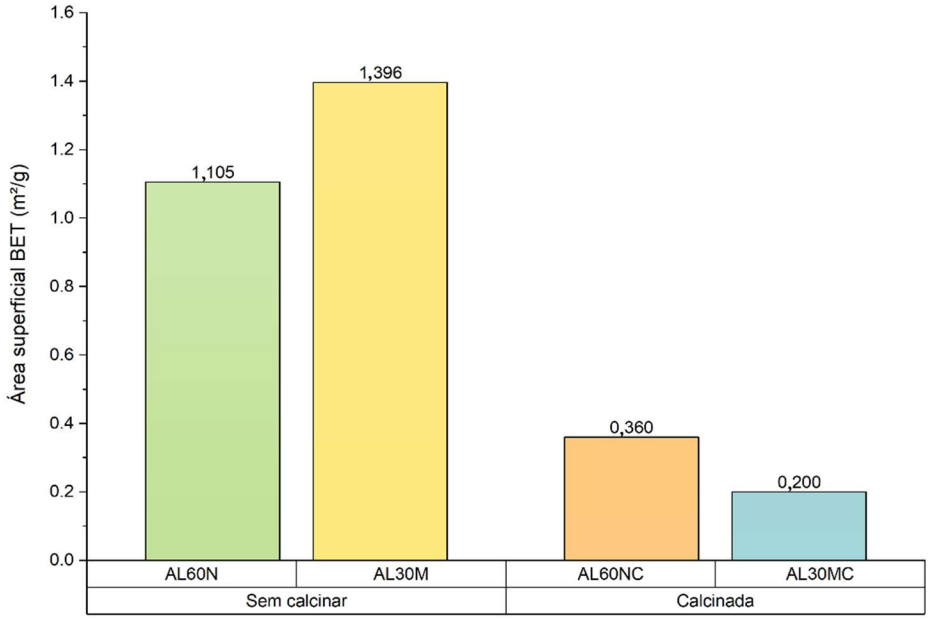
Ao comparar os espectros antes e após a calcinação, verifica-se, conforme Freitas (2026), Li *et al.* (2023) e Iler (1979), a manutenção das bandas associadas às ligações Si–O–Si, indicando que a estrutura fundamental da sílica foi preservada mesmo após o tratamento térmico a 1200 °C. Entretanto, observa-se, conforme Risfaheri *et al.* (2026), Li *et al*. (2023) e Iler (1979), a ausência de bandas atribuídas aos grupos silanol (Si–OH), normalmente identificadas na região entre 3200 e 3700 $cm^{-1}$, sugerindo a ocorrência de desidroxilação da superfície do material durante a calcinação.

Como consequência, ocorre, conforme Li *et al.* (2023) e Freitas (2026), a consolidação da rede silicosa e a redução da quantidade de grupos hidroxila superficiais, tornando a estrutura quimicamente mais estável. Esse comportamento é consistente com o observado para a amostra AL60.N e confirma que o tratamento térmico atuou principalmente sobre a superfície do material, conforme Freitas (2026).

Dessa forma, os resultados de FTIR indicam que a calcinação promoveu modificações superficiais associadas à remoção de hidroxilas, mantendo preservada a estrutura característica da sílica evidenciada pelas bandas em 1094 e 799 $cm^{-1}$.

Na Figura 30 são apresentados os resultados da análise de adsorção de nitrogênio pelo método BET, realizada com o objetivo de avaliar a influência da calcinação na área superficial específica das amostras lixiviadas que apresentaram os melhores resultados nos ensaios anteriores.

**Figura 30 - Influência da calcinação na área superficial das amostras lixiviadas**




Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se uma redução significativa da área superficial em ambas as amostras após o tratamento térmico. A amostra AL60.N apresentou redução de 1,396 $m^2/g$ para 0,360 $m^2/g$, enquanto a amostra AL30.M passou de 1,105 $m^2/g$ para 0,200 $m^2/g$. Esses resultados evidenciam que a calcinação promoveu alterações substanciais na estrutura física do material, apesar das pequenas modificações observadas na composição química e mineralógica, conforme discutido por Freitas (2026) e em concordância com Li *et al.* (2023).

Os resultados obtidos por BET complementam as análises de DRX e FTIR, uma vez que evidenciam quantitativamente as alterações estruturais inferidas pelas demais técnicas. Enquanto o DRX indicou aumento da organização da estrutura cristalina e o FTIR apontou modificações na superfície da sílica decorrentes da desidroxilação, o BET confirmou que essas transformações resultaram em uma expressiva redução da área superficial específica, conforme interpretado por Freitas (2026) com base nos fundamentos estruturais descritos por Iler (1979).

A diminuição da área superficial pode ser atribuída principalmente aos fenômenos de sinterização e densificação da matriz silicosa em altas temperaturas, processo amplamente descrito por Iler (1979). Durante a calcinação a 1200 °C, ocorre intensa difusão atômica, favorecendo o fechamento de poros, a eliminação de defeitos estruturais e a coalescência das partículas. Como consequência, parte significativa da superfície anteriormente acessível ao nitrogênio durante a análise BET torna-se indisponível.

Esse comportamento também está associado ao colapso de microporos e microfissuras existentes no material após a etapa de lixiviação, conforme descrito por Li *et al.* (2023) e Iler (1979). Enquanto o tratamento químico favorece a remoção de impurezas e pode gerar uma estrutura superficial mais acessível, a exposição a temperaturas elevadas promove a reorganização da rede silicosa e o fechamento desses canais, conduzindo à formação de uma estrutura mais compacta. Tal interpretação é consistente com os resultados de DRX, que indicaram aumento da organização estrutural após a calcinação.

Os resultados de BET também auxiliam na interpretação dos dados de FRX e DRX, conforme análise de Freitas (2026). Embora a composição química tenha permanecido praticamente inalterada após a calcinação e as principais fases mineralógicas continuem presentes, a expressiva redução da área superficial demonstra que a principal consequência do tratamento térmico foi a modificação da estrutura superficial do material, coerente com os mecanismos de densificação descritos por Iler (1979). Dessa forma, impurezas residuais contendo ferro e alumínio podem permanecer presentes na composição química, porém incorporadas a uma matriz silicosa mais compacta, dificultando sua exposição superficial e sua identificação como fases cristalinas bem definidas.

De modo geral, os resultados demonstram que a calcinação a 1200 °C atuou principalmente na modificação das características superficiais da sílica previamente purificada pela lixiviação. Embora a composição química e a mineralogia tenham permanecido praticamente inalteradas, observou-se uma expressiva redução da área superficial específica, evidenciando a reorganização da estrutura do material. Esses resultados indicam a obtenção de

uma sílica com maior estabilidade estrutural e menor reatividade superficial, adequada para aplicações que demandam elevada resistência térmica e química.

# 6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa demonstrou a viabilidade técnica da valorização de resíduos arenosos de minério de ferro por meio do enriquecimento de sílica via lixiviação ácida, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos minerais e para a inserção desses materiais em estratégias de economia circular.

A caracterização do resíduo revelou uma matriz predominantemente quartzosa contendo impurezas associadas principalmente à hematita e à microclina, evidenciando o potencial do material como fonte alternativa de sílica. Os resultados mostraram que a eficiência da lixiviação foi fortemente influenciada pelo agente lixiviante empregado e pelo tempo de processamento.

Entre as condições avaliadas, a lixiviação com ácido nítrico apresentou o melhor desempenho global, alcançando reduções de 58,7% de $Fe_2O_3$, 22,8% de $Al_2O_3$ e 18,9% de $K_2O$ após 60 minutos de tratamento. Embora a mistura ácida composta por HCl, $H_2SO_4$ e $HNO_3$ tenha promovido remoção de $Fe_2O_3$ equivalente em menor tempo de processamento, sua eficiência na remoção das demais impurezas foi inferior à observada para o sistema nítrico.

O pré-tratamento térmico a 800 °C mostrou-se prejudicial à etapa de purificação em ambos os sistemas estudados, reduzindo significativamente a remoção de $Fe_2O_3$. No sistema nítrico, a extração foi reduzida de 58,7% para 28,1%, enquanto na mistura ácida a remoção caiu de 58,7% para 3,8%, comportamento associado à formação de gel de sílica passivante induzido pela presença de $H_2SO_4$.

A calcinação a 1200 °C aplicada às amostras lixiviadas promoveu desidroxilação superficial, reorganização estrutural e redução da área superficial específica, resultando em material de maior estabilidade química e térmica. Entretanto, esse tratamento não contribuiu para o aumento da eficiência de purificação da sílica.

Dessa forma, conclui-se que a lixiviação direta com ácido nítrico por 60 minutos, sem pré-tratamento térmico, constitui a rota mais eficiente para o enriquecimento de sílica a partir do resíduo arenoso estudado. Os resultados obtidos evidenciam o potencial de valorização desse resíduo como matéria-prima alternativa para aplicações industriais, contribuindo para a redução de passivos ambientais e para o desenvolvimento de soluções sustentáveis em engenharia de materiais.

# 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas ao longo do processo de lixiviação ácida, algumas direções podem ser propostas para trabalhos futuros, visando melhorar a eficiência global do tratamento e compreender de forma mais detalhada os fenômenos envolvidos.

- Estudo aprofundado do pré-tratamento térmico: investigar de forma mais sistemática a influência de diferentes temperaturas, tempos de permanência e métodos de resfriamento no material. O objetivo é identificar condições mais eficientes de tratamento térmico que favoreçam a formação de microfissuras e aumentem a área reativa, possibilitando uma maior remoção de impurezas em menores tempos de lixiviação.
- Avaliação de diferentes regimes de resfriamento: analisar comparativamente resfriamento natural, resfriamento controlado e resfriamento brusco, verificando qual condição promove maior fragilização da matriz mineral sem causar efeitos negativos como sinterização ou perda de reatividade.
- Investigação dos fenômenos de dissolução e reprecipitação: aprofundar o estudo do comportamento do sistema após aproximadamente 60 minutos de lixiviação, etapa em que se observa possível perda de eficiência. Deve-se avaliar como processos de reprecipitação de espécies dissolvidas podem estar afetando a cinética global e como esses efeitos podem ser minimizados.
- Avaliação da lixiviação sob refluxo: estudar a influência da utilização de refluxo durante o processo de lixiviação ácida, verificando se essa condição melhora a estabilidade química do sistema, evita perdas de reagentes e contribui para maior eficiência de extração, ou se pode intensificar efeitos de reprecipitação.
- Estudo de combinações de agentes lixiviantes: investigar novas formulações e combinações de ácidos, avaliando possíveis efeitos sinérgicos entre diferentes sistemas lixiviantes. Essa etapa pode incluir uma nova otimização da rota de lixiviação ácida, buscando maior seletividade na remoção de impurezas e maior eficiência global do processo.

# REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário mineral brasileiro**: principais substâncias metálicas. Coordenação técnica de Antônio A. Amorim Neto e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução ANM n.º 189, de 25 de novembro de 2024. Atualiza as regras para o aproveitamento de resíduos e estéreis no setor minerário. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 nov. 2024. Disponível em: https://anmlegis.datalegis.net. Acesso em: 26 abr. 2026.

BRAGAGNOLO, L.; PRIETTO, P. D. M.; KORF, E. P. Compositional properties and geotechnical behavior of mining tailings: a review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [*S. l.*], v. 22, p. 6305-6318, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13762-024-06229-9. Acesso em: 26 abr. 2026.

BRASIL. Lei n.º 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1 out. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 26 abr. 2026.

CARMIGNANO, O. R.; VIEIRA, S. S.; TEIXEIRA, A. P. C.; LAMEIRAS, F. S.; BRANDÃO, P. R. G.; LAGO, R. M. Iron ore tailings: characterization and applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [*S. l.*], v. 32, n. 10, p. 1895-1911, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100. Acesso em: 26 abr. 2026.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; DO CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. D. X. P.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. S.; PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [*S. l.*], v. 15, p. 145-151, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002. Acesso em: 26 abr. 2026.

CUBI, G. M. O.; CORREIA, J. C. A.; LIMA, L. R. P.; SOARES, P. S. M.; SANTOS, I. D.; DUTRZ, A. J. B. Valorization of iron ore tailings for high-grade silica sand production through roasting pretreatment followed by magnetic separation and acid leaching. **Minerals Engineering**, [*S. l.*], v. 241, 110179, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.110179. Acesso em: 26 abr. 2026.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. 3. ed. London: The Mineralogical Society, 2013. 498 p.

FIGUEIREDO, M. A.; OLIVEIRA, T. A.; SHINZATO, T. M.; FIGUEIREDO, J. H. Aspectos pedogeomorfológicos e mineralógicos de uma topossequência de solos gnáissicos no Complexo Bação – Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 29, n. 1, p. 71-82, 2002.

FREITAS, E. S. A. **Concentração de sílica a partir de resíduo arenoso de minério de ferro por lixiviação ácida**: avaliação dos parâmetros de processo e do efeito da calcinação. 2026. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2026.

HÄRKÖNEN, M.; KEISKI, R. L. Dissolution of phlogopite in nitric acid. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, [*S. l.*], v. 23, n. 2, p. 251-255, 1984.

ILER, R. K. **The chemistry of silica**: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica. New York: John Wiley & Sons, 1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Práticas em circularidade no setor mineral**. 2. ed. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: https://IBRAM.org.br/wp-content/uploads/2024/09/IBRAM_Praticas-em-Circularidade-no-Setor-Mineral_2_edicao-2.pdf. Acesso em: 26 abr. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Anuário IBRAM**: mineração do Brasil (ano base 2024). Brasília: IBRAM, out. 2025. Disponível em: https://IBRAM.org.br/wp-content/uploads/2025/10/IBRAM_Anuario_IBRAM_Mineracao_do_Brasil_WEB.pdf. Acesso em: 26 abr. 2026.

KHALIFA, M.; EL-REHIM, V. A.; SOUAYA, E. R.; ABO-ELDHAHAB, H. M. Innovative technology for the production of high-purity silica sand by thermal treatment and acid leaching process. **Hydrometallurgy**, [*S. l.*], v. 185, p. 204-209, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.02.008. Acesso em: 26 abr. 2026.

KUWAHARA, Y.; AOKI, S. Dissolution of magnesium and aluminium from phlogopite and montmorillonite in nitric acid solutions at 25 °C. **Applied Clay Science**, [*S. l.*], v. 10, n. 3, p. 233-241, 1995.

LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F. V. **Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno**. Rio de Janeiro: CPRM, 2014. 208 p. (Informe de recursos minerais. Série metais – informes gerais, 2).

LI, S.; SHI, X.; FENG, J.; SUN, J.; LIU, J. Influence of heat treatment on the microstructure and surface groups of Stöber silica. **Materials Research Express**, [*S. l.*], v. 10, n. 10, 105004, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2053-1591/acfac2.

LONG, H.; ZHOU, Y.; LI, X.; DENG, S.; HU, Z.; TANG, X. Advanced processing techniques and impurity management for high-purity quartz in diverse industrial applications. **Minerals**, [*S. l.*], v. 14, n. 6, p. 571, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/min14060571. Acesso em: 26 abr. 2026.

LONG, H.; TANG, J.; GAO, X.; CHEN, S.; ZHANG, W. Utilization of high-silicon iron ore tailings for 4N8 high-purity quartz powder production via two-stage acid leaching. **Inorganic Chemistry**, [*S. l.*], v. 64, p. 3805-3823, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.4c04882. Acesso em: 26 abr. 2026.

MALTRANA, V.; MORALES, J. The use of acid leaching to recover metals from tailings: a review. **Metals**, [*S. l.*], v. 13, n. 11, 1862, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/met13111862. Acesso em: 26 abr. 2026.

OKADA, K.; TOMITA, T.; KAMESHIMA, Y.; YASUMORI, A. Effect of silica structure on the preparation of silica gel from layered silicates by acid treatment. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [*S. l.*], v. 110, n. 12, p. 1007-1011, 2002.

PIRES, K. S.; SOUZA, A. H.; ABREU, B. N.; OLIVEIRA, S. F.; ROCHA, G. A. Mineralogical characterization of iron ore tailings from the Quadrilátero Ferrífero, Brazil, by eletronic quantitative mineralogy. **Materials Research**, [*S. l.*], v. 22, n. 6, e20190194, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0194. Acesso em: 26 abr. 2026.

QU, J.; LIU, N.; ZHENG, S.; CHE, L.; ZHANG, L.; SHAO, S. Study on the purification mechanism of low-grade silicon ore through a combination of direct roasting and pressure leaching. **Silicon**, [*S. l.*], v. 16, p. 5257-5271, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12633-024-02941-8. Acesso em: 26 abr. 2026.

QIU, Y.; ZHENG, J.; HU, X.; LI, Y.; ZHANG, G. Phase transformation of hematite to magnetite during CO reduction: experimental and DFT-assisted insights. **Minerals Engineering**, [*S. l.*], v. 232, 109525, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109525.

RISFAHERI, R.; BUDIMAN, A.; SUTIJAN, S.; ROCHMADI, R. Sustainable production of high-purity amorphous silica from rice husk: a comparative study on the impact of fresh and reused hydrochloric acid leaching. **South African Journal of Chemical Engineering**, [*S. l.*], v. 56, 100848, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sajce.2026.100848. Acesso em: 26 abr. 2026.

SILVA, A. C.; SILVA, E. M.; SOUZA, V. C.; FIGUEIREDO, R. A. Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil. **Revista Espinhaço**, [*S. l.*], v. 5, n. 2, p. 44-53, 2016.

SILVA, G. P.; BALTHAZAR, M. P.; LENA, J. C.; COSTA, A. M. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e resíduo da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p. 45-52, 2006.

SOUZA, A. D.; PINA, P. S.; LEÃO, V. A.; SILVA, C. A.; SIQUEIRA, P. F. The leaching kinetics of a zinc silicate ore in sulfuric acid. **Hydrometallurgy**, [*S. l.*], v. 89, n. 3-4, p. 337-348, 2007.

SOUZA, A. H.; PIRES, K. S.; OLIVEIRA, S. F.; CHAVES, A. P.; KAHN, H. Mineralogical characterization applied to iron ore tailings from the desliming stage with emphasis on quantitative electron microscopy (QEM). **Materials Research**, [*S. l.*], v. 23, n. 6, e20190677, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0677. Acesso em: 26 abr. 2026.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral commodity summaries 2025**. Reston: U.S. Department of the Interior, 2025. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf. Acesso em: 26 abr. 2026.

XIE, Y.; WANG, J.; CHEN, S.; HUANG, Z.; GONG, Y. Recent advances in the marketing, impurity characterization and purification of quartz. **Minerals and Mineral Materials**, [*S. l.*], v. 2, p. 16, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s44312-023-00016-z. Acesso em: 26 abr. 2026.

ZUEVA, S.; INNOCENZI, V.; IPPOLITO, N. M.; BIRLOAGA, I.; VEGLIÒ, F.; FERELLA, F. Iron removal from quartz ore by acid leaching: from lab- to pilot-scale. **Sustainability**, [*S. l.*], v. 17, n. 22, 10008, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su172210008.