



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



HUMBERTO DA COSTA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E MINERALÓGICA DE UM MINÉRIO DE
LÍTIO**

**Ouro Preto
2026**

HUMBERTO DA COSTA PEREIRA

humberto.pereira@aluno.ufop.edu.br

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E MINERALÓGICA DE UM MINÉRIO DE
LÍTIO**

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Janine Rodrigues Figueiredo.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Humberto da Costa Pereira

CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E MINERALÓGICA DE UM MINÉRIO DE LÍTIO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 24 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr.^a Janine Rodrigues Figueiredo- Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Flávio Luiz Martins - Universidade Federal de Ouro Preto
M. Sc. Lucas Jean Wurzner - Universidade Federal de Ouro Preto

Janine Rodrigues Figueiredo, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/03/2026, às 15:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1067436** e o código CRC **9F1550A0**.

Aos meus queridos pais, Ana Paula da
Costa Pereira e Gilmar Aleixo Pereira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar saúde, força e sabedoria ao longo dessa caminhada, guiando-me nos momentos difíceis e permitindo que eu chegasse até a conclusão deste trabalho e dessa etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, Gilmar e Ana Paula, expresso minha gratidão por todo o apoio, incentivo e compreensão durante minha trajetória acadêmica e pessoal. Obrigado por acreditarem em mim, por nunca medirem esforços para me ajudar e por serem minha base em todos os momentos. Essa conquista também é de vocês.

À minha irmã, Maria Alice, agradeço pelo carinho, companheirismo e alegria que traz aos meus dias. Sua presença e incentivo tornaram essa caminhada mais leve, e sou muito grato por ter você ao meu lado.

À minha namorada, Larissa, agradeço pelo carinho, paciência e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por estar ao meu lado nos momentos de cansaço, por me incentivar a continuar e por tornar tudo mais leve.

Agradeço à minha orientadora, Janine Rodrigues Figueiredo, por ter aceitado orientar este trabalho, pela confiança, dedicação, disponibilidade e pelas contribuições ao longo de todo o processo de desenvolvimento da pesquisa. Seu apoio e orientação foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, agradeço por estarem presentes desde o início dessa jornada, compartilhando experiências, conselhos e apoio, que contribuíram muito para meu crescimento acadêmico e pessoal.

A todos os professores do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), meu agradecimento pelo conhecimento transmitido e pela contribuição para minha formação acadêmica e profissional.

À AMG Brasil e à Fundação Gorceix, agradeço pela oportunidade e pelo apoio, que foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional durante o período de estágio.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão dessa etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

A crescente demanda por lítio, impulsionada pela transição energética e pela produção de baterias de íons de lítio, reforça a importância do desenvolvimento de rotas eficientes de beneficiamento para minérios pegmatíticos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização mineralógica e magnética de um minério de lítio proveniente de um corpo pegmatítico, avaliando o potencial da separação magnética como etapa preliminar no seu beneficiamento. A amostra foi submetida à análise granulométrica, ensaios de separação magnética úmida em separador do tipo WHIMS sob diferentes intensidades de campo (2A a 6A), além de análises por difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). A distribuição granulométrica indicou predomínio de frações intermediárias a finas, com D50 estimado em aproximadamente 0,330 mm, faixa favorável ao condicionamento da liberação do espodumênio frente aos minerais de ganga presentes no pegmatito. Os ensaios de separação magnética evidenciaram baixa recuperação mássica das frações magnéticas, porém com enriquecimento progressivo em Fe_2O_3 , indicando a concentração seletiva de minerais paramagnéticos portadores de ferro. Em contrapartida, os minerais litíferos e a matriz félsica, caracterizados por susceptibilidade magnética muito baixa e comportamento essencialmente diamagnético, permaneceram predominantemente na fração não magnética. Os resultados demonstram que a separação magnética é eficiente como etapa de pré-concentração, promovendo a remoção seletiva de minerais contaminantes e contribuindo para a melhoria da qualidade da alimentação de etapas subsequentes de beneficiamento, embora não se configure como método de concentração final para o espodumênio.

Palavras-chave: lítio, pegmatitos, caracterização mineralógica, separação magnética, beneficiamento mineral.

ABSTRACT

The growing demand for lithium, driven by the energy transition and the production of lithium-ion batteries, reinforces the importance of developing efficient processing routes for pegmatite ores. In this context, the objective of this study was to perform the mineralogical and magnetic characterization of a lithium ore from a pegmatite body, evaluating the potential of magnetic separation as a preliminary stage in its beneficiation. The sample was subjected to granulometric analysis, wet magnetic separation tests in a WHIMS-type separator under different field intensities (2 A to 6 A), as well as X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) analyses. The granulometric distribution indicated a predominance of intermediate to fine fractions, with an estimated D50 of approximately 0.330 mm, a range favorable for conditioning the release of spodumene from the gangue minerals present in the pegmatite. Magnetic separation tests showed low mass recovery of magnetic fractions, but with progressive enrichment in Fe_2O_3 , indicating the selective concentration of iron-bearing paramagnetic minerals. In contrast, lithiniferous minerals and the felsic matrix, characterized by very low magnetic susceptibility and essentially diamagnetic behavior, remained predominantly in the non-magnetic fraction. The results demonstrate that magnetic separation is efficient as a pre-concentration stage, promoting the selective removal of contaminating minerals and contributing to the improvement of feed quality in subsequent beneficiation stages, although it is not a final concentration method for spodumene.

Keywords: lithium, pegmatites, mineralogical characterization, magnetic separation, mineral processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mineral espodumênio.	16
Figura 2 - Fluxograma da metodologia de preparação e ensaios.	24
Figura 3 - Separador magnético de alta intensidade	26
Figura 4 - Curva de distribuição granulométrica	29
Figura 5 - Difratoograma de raios X da amostra global.	30
Figura 6 - Difratoograma de raios X da fração magnética obtida a 2A.	31
Figura 7 - Difratoograma de raios X da fração magnética obtida a 3A.	32
Figura 8 - Difratoograma de raios X da fração magnética obtida a 5,5A.	33
Figura 9 - Difratoograma de raios X da fração magnética obtida a 6A.	34
Figura 10 - Recuperação mássica e teor de Fe_2O_3 em função da corrente aplicada.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais minerais portadores de lítio.	15
Tabela 2 - Distribuição granulométrica da amostra	28
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de separação magnética.....	35
Tabela 4 - Fases minerais identificadas nas frações magnéticas e teores de Fe_2O_3	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampère

DRX – Difração de raios X

ETR - Elementos terras raras

FRX – Fluorescência de raios X

MAG – Magnético

MLA – Analisador de liberação mineral (*Mineral liberation analyser*)

SEM/EDS - Microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia

WHIMS – Separador magnético de alta intensidade a úmido (*Wet high intensity magnetic separator*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	Objetivo Geral.....	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Lítio: Propriedades e Aplicações.....	12
3.2	Depósitos de Lítio, Reservas e Produção	13
3.3	Minerais Portadores de Lítio.....	14
3.3.1	Espodumênio.....	16
3.3.2	Outros Minerais	17
3.3.3	Propriedades Magnéticas dos Minerais Portadores de Lítio e de Ganga.....	19
3.4	Técnicas de Caracterização Magnética e Mineralógica	20
3.5	Separação Magnética: Princípios e Aplicações no Beneficiamento do Lítio.....	22
4	METODOLOGIA	23
4.1	Amostragem e Preparação das Amostras	23
4.2	Ensaio de Caracterização Granulométrica.....	24
4.3	Ensaio de Caracterização Magnética.....	25
4.4	Cálculo da Recuperação Mássica.....	26
4.5	Ensaio de Caracterização Mineralógica.....	27
4.6	Análises Químicas.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Análise Granulométrica.....	27
5.2	Composição Mineralógica da Amostra.....	29
5.2.1	Amostra Global.....	30
5.2.2	Ensaio 1 – Corrente de 2A.....	31
5.2.3	Ensaio 2 – Corrente de 3A.....	32
5.2.4	Ensaio 3 – Corrente de 5,5A	33
5.2.5	Ensaio 4 – Corrente de 6 A.....	34
6	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o debate sobre mudanças climáticas reforçou a urgência da transição energética, com a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis como forma de reduzir emissões de gases de efeito estufa e usar os recursos naturais de maneira mais responsável. Esse movimento global incentiva o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e ambientalmente responsáveis, nos quais o armazenamento de energia desempenha papel essencial ao garantir a estabilidade de sistemas elétricos baseados em fontes intermitentes, como a solar e a eólica, além de impulsionar a mobilidade elétrica (Iea, 2021). Nesse cenário, o lítio consolida-se como um dos metais estratégicos mais importantes da atualidade, sendo fundamental conhecer suas características e os principais minerais que o contêm.

O lítio é empregado em diversos segmentos industriais, destacando-se na fabricação de cerâmicas, vidros especiais, lubrificantes, ligas metálicas e, sobretudo, na produção de baterias de íons de lítio. As baterias de íons de lítio são amplamente empregadas em dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário de energia, desempenhando papel central na consolidação de uma economia de baixo carbono e na redução da dependência de combustíveis fósseis (Hasan *et al.*, 2025; Milagre, 2023). Nesse contexto, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos na área da mineração, especialmente relacionados à sustentabilidade, à eficiência produtiva e à inovação tecnológica nos processos de lavra e de beneficiamento de minerais de lítio.

Do ponto de vista geológico, os depósitos de lítio de maior relevância econômica são encontrados em rochas pegmatíticas, sendo os principais minerais de lítio: o espodumênio; a lepidolita; e a petalita. Esses minerais encontram-se associados a minerais de ganga, como quartzo, feldspatos e micas. Além de minerais acessórios ricos em ferro, como óxidos e silicatos ferrosos, o que torna o beneficiamento mais complexo e desafiador. A complexidade composicional dos minérios pegmatíticos e a variação das fases minerais exigem uma compreensão detalhada das propriedades que influenciam o desempenho dos métodos de beneficiamento do lítio (Eliotério *et al.*, 2019).

Entre os principais desafios, destaca-se a presença de minerais ferrosos frequentemente associados ao espodumênio nos pegmatitos. Esses minerais podem atuar como contaminantes, reduzindo a pureza do concentrado e limitando sua utilização em produtos de maior valor

agregado, como cerâmicas e vidros especiais — materiais sensíveis à coloração e às propriedades ópticas alteradas pelo ferro. Deve-se compreender como as características mineralógicas e magnéticas desses minerais de ganga interferem na eficiência das etapas de separação afim de produzir concentrados de maior qualidade e melhor aproveitamento dos recursos minerais (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a caracterização mineralógica, por meio de técnicas como a Difração de Raios X (DRX) e a Fluorescência de Raios X (FRX), fornece informações fundamentais sobre a composição e a associação entre os minerais portadores de lítio e minerais de ganga (Pöllmann, 2021). Por sua vez, a caracterização magnética permite avaliar o grau de resposta dos minerais ao magnetismo, indicando o potencial de aplicação da separação magnética como método de beneficiamento. O que contribui para a identificação das propriedades que influenciam a recuperação do lítio, na escolha da melhor rota de processo, e otimização da concentração (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de aplicação da separação magnética como etapa preliminar no beneficiamento de um minério de lítio, com base em análises mineralógicas e magnéticas realiza das por meio de ensaios de caracterização. Esses ensaios incluíram análise granulométrica, separação magnética, difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), permitindo identificar as fases minerais presentes, determinar a composição química e avaliar o contraste magnético entre as fases. Os resultados obtidos forneceram subsídios técnicos para compreender o comportamento do minério sob diferentes intensidades de campo magnético e, assim, contribuíram para o aprimoramento das rotas de beneficiamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi realizar a caracterização mineralógica e magnética de uma amostra de minério de lítio.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais minerais portadores de lítio e seus minerais associados através do DRX.

- Determinar a composição química da amostra por meio de análise em FRX.
- Investigar o comportamento magnético das fases minerais presentes por meio de testes de separação magnética em diferentes intensidades de campo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lítio: Propriedades e Aplicações

O lítio é um elemento químico pertencente à família dos metais alcalinos, caracterizado por apresentar o menor peso atômico entre os metais e por ter elevada eletropositividade. Suas propriedades físico-químicas, como baixa densidade, elevado potencial eletroquímico e alta reatividade, tornam-no essencial para diversas aplicações industriais e tecnológicas. A leveza e a capacidade de condução de corrente elétrica conferem ao lítio grande importância na produção de baterias recarregáveis. Especialmente, as baterias de íons-lítio, utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia renovável (Carvalho *et al.*, 2021).

Além disso, o lítio apresenta coloração branco-prateada e é altamente reativo, o que o impede de ser encontrado na forma metálica livre na natureza. Sua ocorrência está associada a rochas magmáticas, especialmente nos minerais espodumênio, lepidolita, petalita e amblygonita. Esses minerais contêm o lítio combinado em estruturas cristalinas complexas, com teores variáveis de óxido de lítio (Li_2O) (Braga e Sampaio, 2008).

Essas propriedades conferem ao lítio uma ampla gama de aplicações industriais, com destaque para a produção de compostos como o carbonato e o hidróxido de lítio. Estes compostos são considerados produtos intermediários e básicos, a partir dos quais podem ser sintetizados diversos outros derivados. O hidróxido de lítio monohidratado, por exemplo, é amplamente utilizado na fabricação de graxas lubrificantes de alto desempenho, graças à sua estabilidade térmica e resistência à umidade. Já o carbonato de lítio, além de ser o composto mais comercializado, desempenha papel essencial na indústria cerâmica, na fabricação de vidros, e é empregado na produção de baterias recarregáveis, setor que vem crescendo exponencialmente com o avanço dos dispositivos eletrônicos e dos veículos elétricos (Braga e Sampaio, 2008).

Adicionalmente, a capacidade do lítio de reduzir a temperatura de fusão e a viscosidade em banhos eletrolíticos o torna fundamental na metalurgia do alumínio. O metal também se

mostra eficaz como agente de controle de temperatura e umidade em sistemas de ar-condicionado e desumidificadores, por meio de compostos como o brometo e o cloreto de lítio. Na indústria farmacêutica, o carbonato de lítio é amplamente empregado no tratamento de transtornos bipolares, evidenciando a versatilidade do elemento em diferentes campos tecnológicos e científicos (Braga; Sampaio, 2008; Carvalho *et al.*, 2021).

Conforme Carvalho *et al.* (2021), a crescente demanda por compostos de lítio tem exigido avanços nas técnicas de concentração e purificação do minério, especialmente no caso do espodumênio, principal mineral fonte do elemento em pegmatitos. Para que o lítio seja aproveitado industrialmente, é necessário submetê-lo a processos de cominuição, separação por tamanho e flotação, visando à obtenção de concentrados com alto teor de Li_2O . A eficiência desses processos está diretamente relacionada às características físico-químicas do mineral e à granulometria da alimentação. Assim, compreender as propriedades dos diferentes minerais de lítio é fundamental para o desenvolvimento de processos metalúrgicos mais eficazes e de menor impacto ambiental.

3.2 Depósitos de Lítio, Reservas e Produção

Os principais depósitos de lítio concentram-se em dois tipos geológicos distintos: salmouras continentais e os pegmatitos de rochas duras. As salmouras ocorrem predominantemente em regiões áridas e de elevada altitude, como o Triângulo do Lítio, localizado na América do Sul (Argentina, Bolívia e Chile). Nesses ambientes, a extração baseia-se em processos mais simples e dependentes de condições climáticas, em que a evaporação intensa promove a concentração de elementos químicos nos lagos salinos. Essas reservas totalizam 53 milhões de toneladas do metal, com destaque para os salares de Uyuni, Hombre Muerto e Atacama, situados na Bolívia, na Argentina e no Chile, respectivamente. Apesar de possuírem as maiores reservas, a exploração nesses países varia quanto ao grau de maturidade, sendo o Chile o mais avançado em termos de produção. Embora as salmouras representem grande parte das reservas globais, os pegmatitos destacam-se pela maior concentração de lítio por tonelada de minério (Zorzal *et al.*, 2025).

Os pegmatitos são rochas ígneas de granulação grosseira, associadas a contextos geológicos estáveis e que apresentam elevada concentração de minerais portadores de lítio, como espodumênio e lepidolita. Os pegmatitos enriquecidos do tipo LCT (lítio-césio-tântalo) exigem métodos de lavra e beneficiamento mais complexos e energeticamente intensivos, porém

permitem maior pureza do produto final e a coprodução de outros metais estratégicos (Timich, 2021).

A ocorrência e distribuição geológica dos minerais portadores de lítio estão relacionadas a processos magmáticos e hidrotermais, que, nos estágios finais de cristalização, favorecem a concentração de elementos incompatíveis, como o lítio, no magma residual. Esse processo leva à formação de pegmatitos enriquecidos, que são explorados industrialmente em diversos países, como Austrália, Canadá, Brasil, Zimbábue e Portugal, com destaque para a Austrália, líder mundial na produção de lítio (Timich, 2021).

O Brasil apresenta elevado potencial para a extração de lítio, com reservas estimadas em aproximadamente 540 mil toneladas de lítio contido (USGS, 2026), destacando-se os depósitos localizados no estado de Minas Gerais, especialmente na região conhecida como Vale do Lítio, que abrange os municípios de Araçuaí e Itinga, no Vale do Jequitinhonha e a província pegmatítica no município de Nazareno-MG. A presença de pegmatitos do tipo LCT nessas regiões representa uma oportunidade para o desenvolvimento de projetos de exploração tecnicamente viáveis (Costa *et al.*, 2020).

Apesar do cenário promissor, a expansão da produção de lítio no Brasil enfrenta desafios relacionados à infraestrutura disponível, à regulamentação da mineração em pequena escala e à necessidade de políticas públicas voltadas à agregação de valor. Embora as reservas brasileiras não figurem entre as maiores do mundo, sua qualidade mineralógica e a possibilidade de diversificação da produção conferem ao país uma posição relevante no cenário global. Nesse contexto, o Brasil apresenta potencial para atuar não apenas como fornecedor de matéria-prima, mas também como participante de cadeias produtivas mais complexas, o que reforça a necessidade de investimentos em tecnologia e capacitação técnica para o pleno aproveitamento desse recurso (Zorzal *et al.*, 2025).

3.3 Minerais Portadores de Lítio

Os principais minerais portadores de lítio presentes em pegmatitos graníticos, principalmente do tipo LCT (Lítio-Césio-Tântalo), incluem espodumênio, lepidolita, petalita e amblygonita e ocorrem principalmente associados ao quartzo, feldspato e mica. Esses minerais diferenciam-se quanto à composição química, à estrutura cristalina e às propriedades físico-químicas distintas (Tabela 1), o que influencia suas aplicações industriais e as rotas de beneficiamento mineral adotadas.

Tabela 1 - Principais minerais portadores de lítio.

Minerais	Fórmula	Dureza	Densidade	%Li ₂ O	
				Teórica	Típica
Ambligonita	LiAl(P ₀ ₄)(F,OH)	5,5-6	3	11,9	5
Lepidolita	K(Li,Al ₃)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (F,OH)	2,5-3	2,8–3,3	3,3-7,8	3,0-4,0
Petalita	LiAl(Si ₄ O ₁₀)	6-6,5	2,3–2,5	4,9	3,0-4,5
Espodumênio	LiAl(Si ₂ O ₆)	6,5-7,5	3–3,2	8	1,5-7,0

Fonte: (HAUBER, 2002).

Do ponto de vista da prospecção, esses minerais apresentam respostas espectrais distintas, o que influencia sua identificação por meio de técnicas de sensoriamento remoto. A lepidolita é mais facilmente detectável por espectroscopia, devido às feições de absorção bem definidas, enquanto o espodumênio e a petalita impõem maiores desafios devido à similaridade espectral entre si e à interferência de minerais de alteração, como montmorilonita e illita (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020). Em ambientes pegmatíticos zonados, a associação desses minerais com outras fases exige conhecimento geológico e mineralógico detalhado para viabilizar uma exploração adequada.

A caracterização espectral de minerais portadores de lítio constitui uma ferramenta relevante para sua identificação e diferenciação em ambientes pegmatíticos. Com base em medições espectrais laboratoriais realizadas na região de Fregeneda–Almendra em Portugal, observa-se que minerais como lepidolita, espodumênio e petalita apresentam respostas espectrais distintas, controladas principalmente por sua composição mineralógica e grau de alteração. A lepidolita destaca-se pela presença de feições de absorção bem definidas no infravermelho de ondas curtas, associadas a grupos hidroxila e à incorporação de lítio na estrutura cristalina, o que facilita sua identificação por métodos espectroscópicos. Em contraste, o espodumênio e a petalita exibem assinaturas espectrais mais sutis e, em muitos casos, sobrepostas às de minerais de alteração, como as argilas, dificultando sua discriminação direta. Esses resultados evidenciam o potencial e as limitações do uso da espectroscopia na

prospecção de lítio, ressaltando a importância de análises comparativas em laboratório como suporte à aplicação de técnicas de sensoriamento remoto (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020).

3.3.1 Espodumênio

O espodumênio (Figura 1) é um silicato de lítio e alumínio pertencente ao grupo dos piroxênios, destacando-se como a principal fonte industrial de lítio devido aos seus elevados teores de lítio, com até 8% (Cardoso-Fernandes *et al.*, 2020). O espodumênio geralmente ocorre em cristais prismáticos de grande dimensão, translúcidos a opacos, com colorações que variam de branco-cinza a verde e lilás, sendo bastante comum em depósitos pegmatíticos associados ao granito. É amplamente conhecido por sua dureza, que varia entre 6,5 e 7 na escala de Mohs, e densidade em torno de 3,20 g/cm³. A estrutura cristalina do espodumênio confere estabilidade química e física ao mineral, tornando-o particularmente atrativo para uso na indústria de baterias, cerâmicas e vidros especiais. (Andrade *et al.*, 2019; Araújo, 2022).

Figura 1 - Mineral espodumênio.



Fonte: (HEINZ EBERT, 2026).

O espodumênio encontra-se associado a minerais de ganga como quartzo, albita e muscovita. A textura granoblástica do minério, com intercrescimentos finos entre os minerais, constitui um dos principais desafios do beneficiamento. Assim, o conhecimento detalhado da mineralogia e das relações texturais do espodumênio é essencial para a definição das melhores rotas de processamento (Araújo, 2022).

Portanto, a caracterização tecnológica de minerais é fundamental para a definição de rotas de beneficiamento mineral mais eficazes, sendo conduzida por meio de técnicas como difração de raios X, microscopia óptica e eletrônica, além de análises químicas e espectrometria. Essas ferramentas permitem identificar o grau de pureza do mineral, sua associação a fases secundárias e sua variação composicional ao longo do corpo mineralizado. A distinção entre espodumênio primário e alterado, por exemplo, é crucial, uma vez que o processo de alteração pode reduzir significativamente os teores de lítio aproveitáveis. Adicionalmente, a avaliação da distribuição granulométrica do espodumênio nos diferentes horizontes do pegmatito contribui para o planejamento de lavras seletivas e para o aproveitamento racional do recurso (Araújo, 2022).

3.3.2 Outros Minerais

A lepidolita, uma mica litinífera, apresenta menores concentrações de lítio, porém, possui importância econômica adicional pela presença de elementos como rubídio e cério. A petalita, classificada como um feldspatoide, é valorizada sobretudo por sua elevada estabilidade térmica e baixa expansão, características que favorecem seu uso nas indústrias cerâmica e do vidro. Já a amblygonita, um fosfato de lítio e alumínio, apresenta teores expressivos de lítio e potencial para aplicações químicas específicas, embora sua exploração comercial ainda seja limitada (Araújo, 2022).

Para Andrade *et al.* (2019), os pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema apresentam uma composição mineralógica complexa, abrigando uma diversidade de minerais além do espodumênio, que contribuem significativamente para a potencialidade econômica da região. Entre esses minerais destacam-se o quartzo, a albita, a muscovita, a lepidolita, a petalita e a amblygonita. O quartzo, predominante em grande parte dos pegmatitos, possui alta pureza e é utilizado em diversas aplicações industriais, especialmente nas indústrias de vidro e eletrônica. Já a albita, um feldspato sódico, ocorre em proporções relevantes e está frequentemente associada ao espodumênio, o que exige cuidados adicionais nos processos de separação mineral. A muscovita, por sua vez, é um mineral de mica com valor comercial significativo, utilizado nas indústrias de tintas, borrachas e cosméticos (Andrade *et al.*, 2019).

Conforme Moraes *et al.* (2023), os depósitos pegmatíticos associados à Mina Volta Grande, localizada no município de Nazareno, no estado de Minas Gerais, apresentam notável diversidade mineralógica, reunindo minerais com potencial econômico além do lítio, como

cassiterita, columbita, microlita, apatita, monazita e xenotima. Esses minerais estão frequentemente associados a elementos estratégicos como estanho, tântalo, nióbio e elementos terras raras (ETR), o que amplia o valor agregado da jazida. A cassiterita, por exemplo, é o principal mineral fonte de estanho (SnO_2) e ocorre de forma abundante nas frações grossas do minério, sendo também portadora de inclusões ricas em tântalo e nióbio, o que reforça seu valor metalúrgico e estratégico. A recuperação econômica desses minerais exige técnicas refinadas de caracterização, especialmente devido à sua distribuição mineralógica complexa (Morais *et al.*, 2023).

Minerais como columbita e microlita desempenham papel central na cadeia produtiva do nióbio e do tântalo, além de funcionarem como hospedeiros importantes para os ETR. A columbita apresenta afinidade com elementos terras raras pesadas (HREE), como disprósio e érbio, enquanto a microlita está associada principalmente a terras raras leves (LREE), como cério e lantânio. Esses minerais não apenas ampliam o portfólio econômico da mina, como também abrem possibilidade para a recuperação de subprodutos valiosos. A correta identificação dessas fases minerais foi realizada com apoio de técnicas de análise por retroespalhamento eletrônico (SEM) e microscopia ótica, permitindo mapear as inclusões e compreender os limites de liberação mineral nas diversas rotas de beneficiamento. (Morais *et al.*, 2023)

Na visão de Andrade *et al.* (2019), a presença de minerais litiníferos secundários, como a lepidolita, petalita e amblygonita, amplia as possibilidades de aproveitamento econômico dos pegmatitos. A lepidolita, um silicato de lítio e alumínio, contém teores mais baixos de óxido de lítio em comparação ao espodumênio, mas é uma importante fonte alternativa de lítio, especialmente em depósitos nos quais o espodumênio encontra-se em menor abundância. A petalita, geralmente associada à lepidolita, também apresenta teores aproveitáveis de lítio e possui aplicações em cerâmicas especiais devido à sua estabilidade térmica. Já a amblygonita, embora menos abundante, é considerada valiosa por seus elevados teores de lítio e por seu uso em indústrias químicas e de vidro (Andrade *et al.*, 2019).

Segundo Moraes *et al.* (2023), a apatita se destaca como um mineral que vai além de seu tradicional uso na indústria de fertilizantes. Na Mina Volta Grande, a apatita demonstrou potencial para atuar como mineral portador secundário de ETR, devido à presença de inclusões microscópicas de monazita e xenotima em sua matriz. A monazita concentra predominantemente terras raras leves, enquanto a xenotima é rica em terras raras pesadas, sendo ambas economicamente estratégicas. A presença desses minerais foi identificada mesmo

em amostras de rejeitos, o que indica a possibilidade de reaproveitamento de resíduos do processo principal. Essa abordagem amplia o conceito de aproveitamento mineral e reforça a importância da auditoria mineralógica contínua como ferramenta de gestão de recursos minerais (Morais *et al.*, 2023).

3.3.3 Propriedades Magnéticas dos Minerais Portadores de Lítio e de Ganga

A separação magnética é uma técnica largamente utilizada no beneficiamento de minérios, com base nas diferenças de susceptibilidade magnética entre os minerais constituintes da amostra. Esta propriedade física está diretamente relacionada à capacidade dos minerais de se magnetizarem quando submetidos a um campo magnético externo (Kahn *et al.*, 2013). Os minerais podem ser classificados de acordo com seu comportamento frente ao campo magnético em três categorias principais: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos. Os minerais ferromagnéticos, como a magnetita, apresentam alto magnetismo residual, sendo fortemente atraídos por ímãs. Já os minerais paramagnéticos possuem uma susceptibilidade magnética mais baixa, sendo fracamente atraídos. Por fim, os diamagnéticos, como o quartzo, são repelidos por campos magnéticos (Kahn *et al.*, 2013).

A eficiência da separação magnética está diretamente associada à susceptibilidade magnética dos minerais, propriedade que varia conforme a composição química e a estrutura cristalina e constitui o princípio fundamental desse método de concentração amplamente empregado na indústria mineral. Além da natureza mineralógica, fatores operacionais como a intensidade do campo magnético aplicado e a granulometria do material influenciam significativamente o desempenho do processo (Heavy Minerals and Magnetic Separation, 2024).

Segundo Luz *et al.* (2010), sob a aplicação de campos magnéticos de alta intensidade, minerais portadores de lítio, como o espodumênio, a lepidolita e a petalita, podem apresentar uma resposta magnética extremamente fraca, detectável em separadores de alta intensidade, como os separadores de rolo induzido ou os separadores isodinâmicos, desde que estejam bem liberados da ganga. Esse comportamento é frequentemente descrito como fracamente paramagnético. No entanto, do ponto de vista físico e cristalográfico, a resposta magnética desses minerais é dominada pelo diamagnetismo da matriz silicatada, podendo ocorrer respostas paramagnéticas residuais associadas à presença de impurezas na estrutura mineral. Já os minerais de ganga comumente associados a pegmatitos litíferos, como quartzo, feldspatos

e micas comuns, apresentam comportamento predominantemente diamagnético, não respondendo ao campo magnético e concentrando-se, portanto, nas frações não magnéticas.

Conforme a Heavy Minerals and Magnetic Separation (2024), os minerais de ganga presentes em pegmatitos, como biotita, hornblenda, ilmenita, granada e epidoto, apresentam comportamento paramagnético ou ferromagnético, o que facilita sua remoção por separação magnética. Esses minerais começam a responder a campos a partir de 0,4 até 1,5 ampères, conforme demonstrado no quadro de separabilidade baseado na suscetibilidade magnética. A ilmenita e a granada, por exemplo, são separáveis em campos de baixa intensidade (0,4 A), enquanto biotita, hornblenda e augita requerem campos intermediários (0,8 A). Por fim, minerais como muscovita, espinélio e enstatita respondem a campos de maior intensidade (1,5 A), enquanto o espodumênio e outros minerais litiníferos permanecem inertes, sendo classificados como não magnéticos.

A aplicação estratégica da separação magnética baseada nas propriedades intrínsecas dos minerais representa uma ferramenta de alto valor técnico no beneficiamento de pegmatitos litiníferos. Ao identificar corretamente os limites entre os minerais magnéticos e não magnéticos, é possível elevar a pureza dos concentrados, reduzir a presença de contaminantes como ferro e aumentar a eficiência global do processo. Isso evidencia que o conhecimento sobre o comportamento magnético dos minerais de ganga e dos minerais portadores de lítio é essencial para otimizar os circuitos industriais e atender às exigências de pureza dos mercados de baterias, cerâmicas e compostos químicos (Heavy Minerals and Magnetic Separation, 2024).

3.4 Técnicas de Caracterização Magnética e Mineralógica

Andrade *et al.* (2019) afirmam que as técnicas de caracterização magnética e mineralógica desempenham papel central na definição de rotas tecnológicas mais eficientes para o aproveitamento de minérios litiníferos presentes em pegmatitos. A caracterização magnética tem sido amplamente utilizada para avaliar a suscetibilidade magnética dos diferentes minerais presentes no minério, possibilitando o desenvolvimento de etapas de concentração baseadas na separação magnética. Essa metodologia permite diferenciar minerais de ganga, como a moscovita e o quartzo, daqueles portadores de lítio, como o espodumênio, possibilitando uma etapa preliminar de pré-concentração que reduz custos e melhora o desempenho metalúrgico subsequente (Andrade *et al.*, 2019).

Oliveira (2024) também concorda com essa visão, e afirma que a caracterização mineralógica e magnética desempenha papel essencial no entendimento do comportamento dos minerais durante o beneficiamento, especialmente na flotação do minério de lítio. As técnicas empregadas para tal fim permitem identificar os minerais presentes, suas proporções relativas e as propriedades físico-químicas que influenciam sua separabilidade. A difração de raios X, por exemplo, permite determinar os minerais majoritários da amostra, enquanto a microscopia óptica fornece informações sobre a textura e a associação mineral. Além disso, a análise da massa específica, por meio de picnômetro a gás, permite inferir o grau de liberação dos minerais e auxilia na escolha dos métodos de concentração mais adequados, como a separação em meio denso ou a separação magnética de alta intensidade.

Conforme Moraes *et al.* (2023), a caracterização mineralógica é uma etapa fundamental no contexto do aproveitamento de minérios complexos, pois permite compreender a composição mineral, o grau de liberação dos minerais de interesse e a presença de fases portadoras de elementos estratégicos. No caso da Mina Volta Grande, essa abordagem foi aplicada com rigor, utilizando-se de técnicas como difração de raios X com quantificação por *Rietveld*, microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por dispersão de energia (SEM/EDS) e *Mineral Liberation Analyser* (MLA). A combinação dessas técnicas possibilitou não apenas identificar os minerais predominantes no minério, como feldspato, quartzo, mica e espodumênio, mas também mapear inclusões micrométricas de minerais como monazita e xenotima, importantes portadores de elementos de terras raras.

Nesta linha de raciocínio, para Andrade *et al.* (2019), as técnicas de caracterização mineralógica baseadas em análises por difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX) são fundamentais para identificar com precisão os constituintes mineralógicos do minério. A DRX fornece informações sobre a estrutura cristalina dos minerais, permitindo distinguir com clareza os diferentes tipos de silicatos. Já a FRX oferece dados quantitativos sobre a composição química, sendo particularmente útil para a determinação dos teores de óxido de lítio e de outros elementos, como alumínio, ferro e sódio. A utilização conjunta dessas técnicas permite um diagnóstico detalhado da composição e da qualidade do minério, sendo essencial para o planejamento das etapas de cominuição, flotação e separação magnética (Andrade *et al.*, 2019).

Sendo assim, Oliveira (2024) afirma que a separação magnética se apresenta como técnica indispensável para remover minerais portadores de ferro, como anfíbólios, biotita e ilmenita, cuja presença compromete a qualidade do concentrado de lítio. A semelhança da

densidade desses minerais com o espodumênio dificulta a separação gravítica, tornando a aplicação de campos magnéticos intensos uma alternativa eficaz. A utilização de separadores magnéticos com campo de até 10.000 Gauss possibilita a retirada seletiva desses minerais contaminantes antes da etapa de flotação. Essa etapa preparatória garante uma alimentação mais limpa ao processo, resultando em melhores recuperações e maior pureza do concentrado, atendendo às exigências industriais de teores reduzidos de Fe_2O_3 para a produção de baterias de íon-lítio.

Na visão de Moraes *et al.* (2023), o uso da difração de raios X permitiu identificar com precisão as fases cristalinas presentes no minério, enquanto o SEM/EDS foi essencial para analisar partículas compostas e detectar inclusões submicroscópicas não perceptíveis em análises convencionais. A aplicação do MLA contribuiu significativamente para a quantificação da liberação mineral, revelando, por exemplo, que uma parcela relevante das partículas de columbita ainda se encontrava associada a minerais de ganga, o que representa um desafio para o processo de cominuição e concentração. Esses dados são fundamentais para o planejamento de rotas de beneficiamento mais seletivas e eficientes, especialmente quando se busca o aproveitamento de subprodutos, como nióbio, tântalo e ETRs, presentes em minerais acessórios.

3.5 Separação Magnética: Princípios e Aplicações no Beneficiamento do Lítio

Segundo Oliveira (2024), os resultados obtidos nas etapas de separação magnética influenciam diretamente o desempenho da flotação, pois a presença de minerais contaminantes interfere na ação dos coletores e condicionadores utilizados. O estudo demonstrou que a retirada dos minerais indesejáveis por meio da separação magnética contribuiu para o aumento dos teores de Li_2O no concentrado e para a redução significativa dos teores de Fe_2O_3 , resultado essencial para a aplicação industrial do produto. A combinação entre caracterização mineralógica e ensaios magnéticos permite definir os parâmetros ideais de operação, como intensidade de campo, tempo de residência e granulometria da alimentação, assegurando maior eficiência e menor consumo de reagentes nas etapas seguintes do processo.

Por sua vez, Moraes *et al.* (2023) reforçam que a aplicação da separação magnética em minérios de lítio visa, principalmente, remover minerais contaminantes que apresentam propriedades magnéticas relevantes, como biotita, granada, ilmenita, turmalina e, em alguns casos, micas com teores elevados de ferro. O estudo realizado na Mina Volta Grande evidencia

a eficácia da separação magnética no pré-tratamento do minério, especialmente ao concentrar cassiterita, columbita e microlita, que, embora não sejam minerais de lítio, estão associados ao mesmo ambiente geológico e influenciam diretamente o desempenho global da planta.

Sendo assim, conforme Morais *et al.* (2023), a adoção de equipamentos como separadores de tambor magnético e separadores de correia cruzada permite o tratamento de frações minerais em diferentes granulometrias e respostas magnéticas. Essa abordagem permite a concentração seletiva de minerais magnéticos, sem comprometer os minerais litiníferos, que permanecem nas frações não magnéticas. Além disso, a separação magnética favorece o reaproveitamento de subprodutos, como minerais de nióbio, tântalo e estanho, presentes nas frações magnéticas, o que torna o processo mais eficiente e economicamente viável.

4 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo envolveu a preparação representativa das amostras, seguida de classificação granulométrica e ensaios de separação magnética em diferentes intensidades de campo para avaliar o comportamento do minério de lítio. As frações obtidas foram analisadas por DRX e FRX, o que permitiu identificar as fases minerais e determinar a composição química. A integração desses resultados permitiu relacionar as características mineralógicas e químicas ao comportamento magnético do material, o que possibilitou avaliar o potencial da separação magnética como etapa preliminar no fluxo de beneficiamento do minério.

4.1 Amostragem e Preparação das Amostras

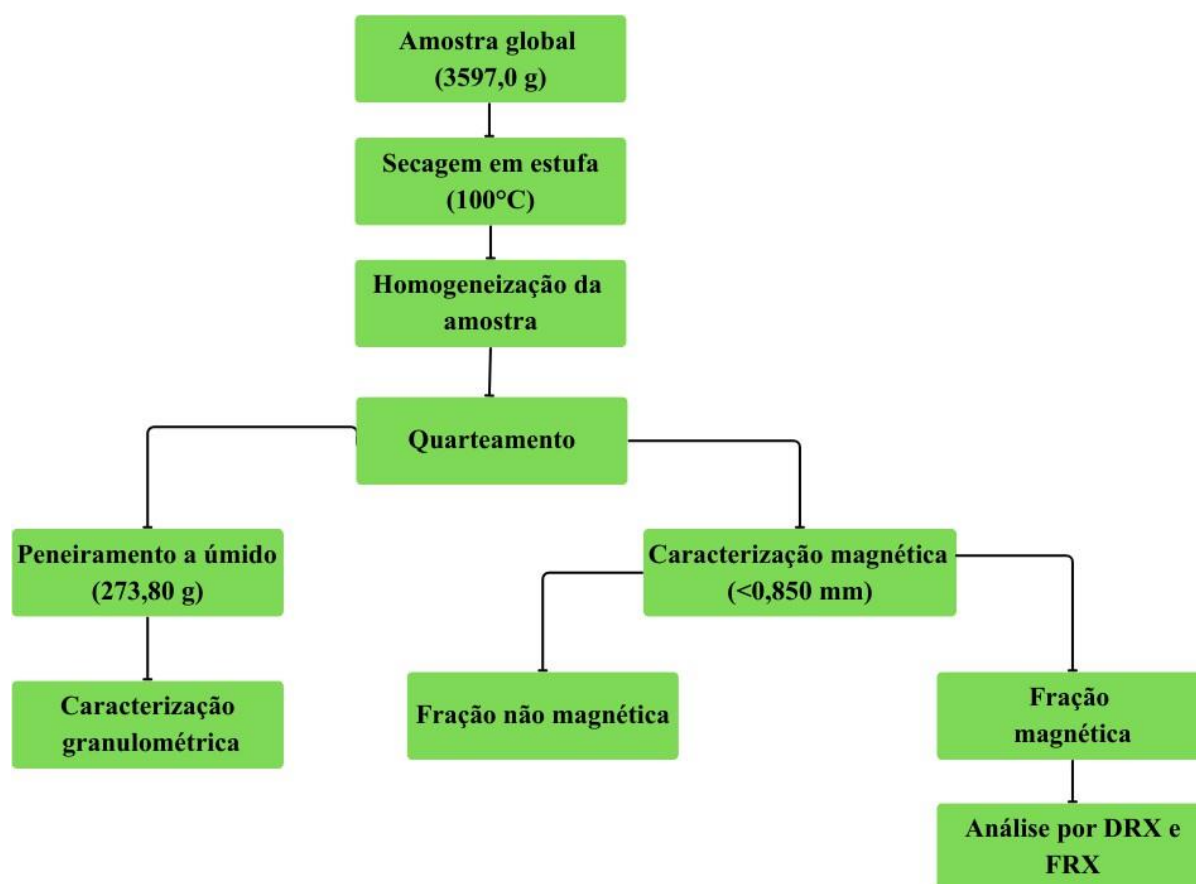
A amostra utilizada neste estudo é representativa de um minério de lítio proveniente de corpo pegmatítico, com massa total inicial de 3597,0 g. O material foi submetido a procedimentos laboratoriais padronizados, visando garantir a homogeneidade e a representatividade necessárias às etapas seguintes de caracterização e ensaios experimentais.

Inicialmente, a amostra global passou por secagem em estufa a temperatura controlada de 100 °C, com o objetivo de eliminar a umidade e evitar interferências nos resultados analíticos. Em seguida, realizou-se o processo de homogeneização, assegurando a distribuição uniforme da amostra. Após essa etapa, o material foi dividido em porções específicas, destinadas aos diferentes ensaios. Uma fração de 273,80 g foi separada para o peneiramento,

enquanto a outra porção restante, com massa de aproximadamente 3324,0 g, foi direcionada à separação magnética.

As amostras resultantes dos processos de separação foram posteriormente pulverizadas para obter uma granulometria adequada às análises por DRX e FRX, assegurando a representatividade e a precisão das determinações mineralógicas e químicas. A Figura 2 apresenta o fluxograma esquemático da metodologia experimental adotada neste estudo.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia de preparação e ensaios.



Fonte: Autor, 2026.

4.2 Ensaios de Caracterização Granulométrica

A amostra obtida após o processo de quarteamento, com massa de 273,80 g, foi destinada à análise granulométrica por peneiramento a úmido, com o objetivo de determinar a distribuição de tamanhos das partículas e avaliar a homogeneidade do material. O ensaio foi realizado em peneirador mecânico por 10 minutos, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas padronizadas de 2,360 mm; 1,700 mm; 1,400 mm; 0,850 mm; 0,500 mm; 0,300 mm; 0,150 mm; 0,075 mm e a fração menor que 0,075 mm.

Após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram secas e pesadas, possibilitando o cálculo da porcentagem retida e acumulada em cada faixa granulométrica, que será apresentada em forma de tabela e curva de distribuição granulométrica.

4.3 Ensaios de Caracterização Magnética

Os ensaios de caracterização magnética foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento do minério de lítio sob diferentes intensidades de campo magnético, a fim de identificar o potencial de separação entre as fases minerais portadoras de lítio e os minerais de ganga. Essa etapa é essencial para compreender a resposta magnética dos minerais e fundamentar a aplicação da separação magnética como processo preliminar de beneficiamento.

Previamente à realização dos ensaios em separador magnético de laboratório, as amostras foram submetidas à separação manual com ímã de mão, com o objetivo de verificar a presença de minerais fortemente magnéticos. A massa retida nessa etapa foi desprezível, indicando baixa ocorrência de minerais com elevada suscetibilidade magnética no material estudado.

Uma amostra com massa total aproximada de 3324,0 g, previamente homogeneizada e com granulometria inferior a 0,850 mm, foi quarteada, originando quatro alíquotas representativas de cerca de 850 g cada, destinadas aos ensaios de separação magnética. Cada alíquota foi submetida a uma intensidade de campo distinta, correspondente às correntes elétricas de 2 A, 3 A, 5,5 A e 6 A. A variação gradual da corrente possibilitou avaliar a influência da intensidade do campo magnético na atração das partículas e na distribuição das frações magnéticas e não magnéticas obtidas.

As amostras previamente homogeneizadas foram submetidas à separação em separador magnético de alta intensidade a úmido, modelo WHIMS 3X4 L, originalmente fabricado pela Carpc Inc. (EUA) e reformado pela Inbras Equipamentos Magnéticos e Vibratórios, localizado no laboratório de tratamento de minérios da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) (Figura 3). O equipamento possui sistema de controle de tensão e corrente elétrica nas bobinas, permitindo ajustar a intensidade do campo magnético aplicado durante os ensaios por meio da variação da corrente elétrica.

Figura 3 - Separador magnético de alta intensidade.



Fonte: Autor, 2026.

Após os ensaios, as frações magnéticas foram coletadas, secas e pulverizadas para análises posteriores de DRX e FRX.

4.4 Cálculo da Recuperação Mássica

A recuperação mássica foi determinada por meio da relação entre a massa de concentrado obtida e a massa de alimentação inicial. Para isso, após cada teste de separação magnética, as amostras foram devidamente filtradas, secas e pesadas. A recuperação mássica foi então calculada utilizando a equação:

$$R_M = \left(\frac{M_C}{M_A} \right) \times 100$$

sendo:

- R_M = recuperação mássica;
- M_C = massa do concentrado;
- M_A = massa da alimentação.

4.5 Ensaios de Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica foi conduzida com o objetivo de identificar as fases minerais presentes no minério e compreender sua associação às frações magnética e não magnética obtidas nos ensaios de separação. Essa etapa é fundamental para correlacionar o comportamento magnético das amostras à sua composição mineralógica e, assim, avaliar o potencial de separação magnética.

A caracterização mineralógica foi realizada pela técnica de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro da marca PanAlytical, modelo X'Pert3Powder, equipado com tubo de cobre operado a 45 kV e 40 mA, com filtro de níquel para a obtenção da radiação $K\alpha_{Cu}$, com comprimento de onda de 1,5406 Å. Os difratogramas foram coletados pelo software Data Collector, em uma faixa de varredura de 5° a 90° (2 θ), com tempo total de aquisição de aproximadamente 14 minutos. A identificação das fases minerais foi realizada no software HighScore Plus, utilizando o banco de dados *Crystallography Open Database* (COD).

4.6 Análises Químicas

As análises químicas foram realizadas por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX) utilizando um espectrômetro da marca Bruker, modelo S2 Puma, equipado com tubo de platina. Por não haver uma curva de calibração específica para o material analisado, a determinação química foi conduzida de forma semiquantitativa, empregando o método Smart-Oxides do equipamento, sendo as amostras preparadas pelo método de pastilha. A técnica foi aplicada com o objetivo de determinar a composição química elementar das amostras, permitindo avaliar os teores relativos dos principais elementos associados às fases minerais identificadas por DRX.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica da amostra foi realizada por peneiramento mecânico, totalizando 273,80 g de material distribuído entre as peneiras de 2,36 mm e < 0,074 mm. A massa total obtida foi de 272,19 g, indicando boa representatividade e baixa perda durante o ensaio. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da amostra.

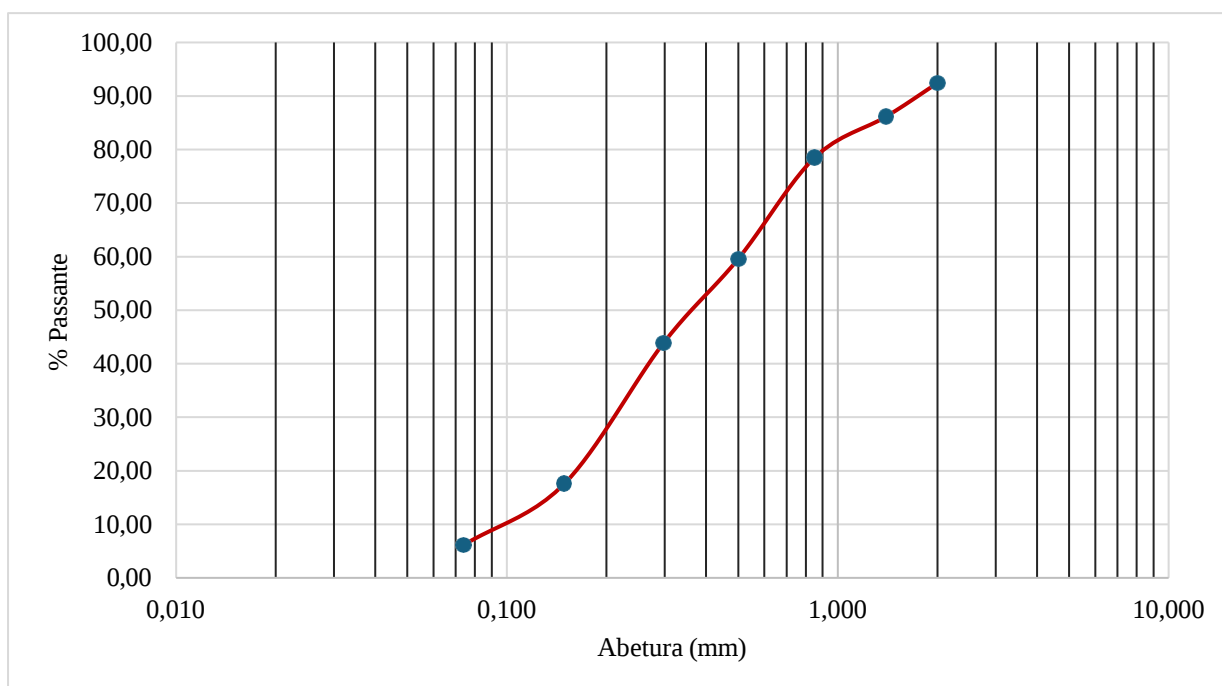
Abertura da Peneira(mm)	Massa retida(g)	% Retida em cada peneira	% Retido acumulado	% Passante na peneira
2,360	11,58	4,25	4,25	95,75
1,700	14,43	5,30	9,56	90,44
1,400	6,53	2,40	11,95	88,05
0,850	23,56	8,66	20,61	79,39
0,500	43,58	16,01	36,62	63,38
0,300	45,15	16,59	53,21	46,79
0,150	73,87	27,14	80,35	19,65
0,074	34,25	12,58	92,93	7,07
<0,074	19,24	7,07	100,00	0,00
Total	272,19	100,00	-----	-----

Fonte: Autor, 2026

Observou-se que as maiores quantidades de material se concentraram nas peneiras de 0,150 mm (27,14%), 0,300 mm (16,59%), 0,500 mm (16,01%) e 0,074 mm (12,58%), indicando predominância de frações finas e intermediárias. Essas frações representam mais de 72% do material total, evidenciando que a amostra apresenta distribuição predominante para tamanhos menores que 0,500 mm. Por outro lado, as frações mais grossas, superiores a 1,40 mm, somaram menos de 12%, demonstrando que a amostra já se encontra significativamente fragmentada.

A partir dos valores acumulados de passante, foi construída a curva granulométrica, mostrada na Figura 4.

Figura 4 - Curva de distribuição granulométrica.



Fonte: Autor, 2026.

Pela análise da curva de distribuição granulométrica, foi possível determinar os diâmetros característicos D50 e D80, correspondentes aos tamanhos de partícula para os quais 50% e 80% da amostra se apresentam passantes, respectivamente. O valor de D50 encontrado foi de aproximadamente 0,330 mm e o D80 $\approx$ 0,880 mm, indicando a predominância de partículas com granulometria intermediária a fina na amostra, resultado compatível com a distribuição granulométrica observada no ensaio de peneiramento.

Esse resultado é relevante para as etapas subsequentes de beneficiamento, especialmente a separação magnética, pois partículas próximas ou menores que o D50 tende a apresentar maior grau de liberação e, conseqüentemente, resposta mais adequada aos processos de concentração. Assim, a granulometria obtida demonstra que a amostra possui distribuição favorável ao beneficiamento, com predominância de tamanhos que facilitam a exposição das fases portadoras de lítio e contribui para maior eficiência nos processos de separação magnética e outras etapas de concentração.

5.2 Composição Mineralógica da Amostra

A caracterização mineralógica da amostra foi realizada principalmente por meio do DRX, aplicada tanto à amostra global quanto às frações magnéticas obtidas após os ensaios de separação magnética. Essa técnica permitiu a identificação das fases cristalinas presentes e a

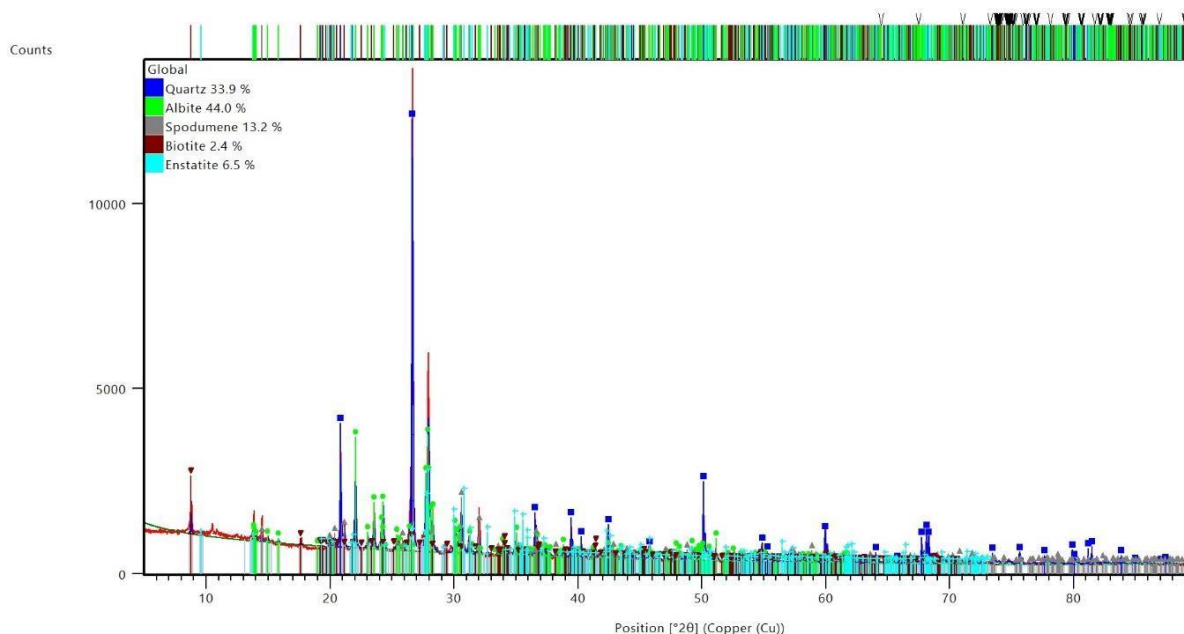
avaliação da distribuição relativa dos minerais entre as diferentes frações magnéticas analisadas. A integração desses resultados com as análises químicas por FRX possibilitou confirmar a mineralogia, por meio da correlação entre os óxidos e as fases minerais reconhecidas nos difratogramas.

5.2.1 Amostra Global

O difratograma da amostra global (Figura 5), apresenta composição mineralógica predominantemente fêlsica, caracterizada pela elevada participação de albite (44,0%) e de quartzo (33,9%), que, juntos, constituem a maior parte da matriz mineralógica. A presença de espodumênio (13,2%) confirma o potencial litinífero da amostra e sua associação a um ambiente pegmatítico típico, ocorrendo disseminado em uma matriz quartzo-feldspática.

Minerais acessórios, como enstatita (6,5%) e biotita (2,4%), ocorrem em menores proporções, indicando contribuição limitada de fases ferromagnesianas na amostra global. Essa composição sugere que o espodumênio está associado principalmente às frações não magnéticas, o que influencia diretamente as estratégias de beneficiamento a serem adotadas.

Figura 5 - Difratograma de raios X da amostra global.



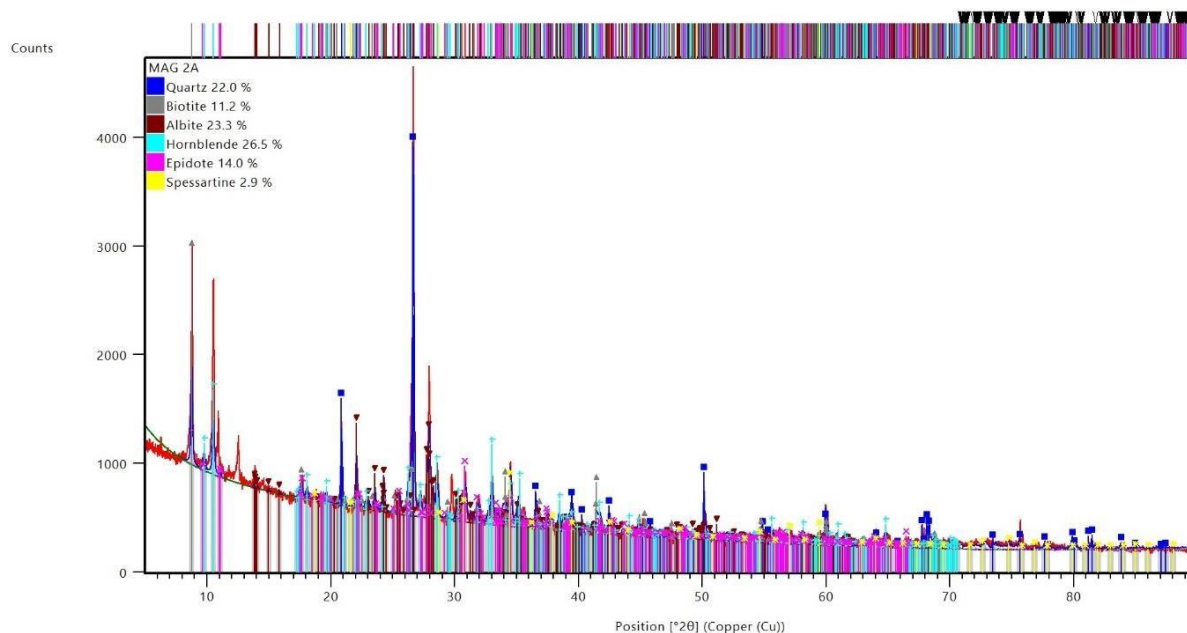
Do ponto de vista químico, a amostra global é caracterizada por teores elevados de SiO_2 (73,27%) e de Al_2O_3 (11,86%), compatíveis com a predominância de quartzo e feldspatos identificados por DRX. Os baixos teores de Fe_2O_3 (2,64%), MgO (3,85%) e MnO (0,33%) indicam a reduzida participação de minerais ferromagnesianos, e corroboram a baixa suscetibilidade magnética da amostra global.

5.2.2 Ensaio 1 – Corrente de 2A

No ensaio realizado sob corrente de 2A, a fração magnética apresentou massa de 7,40 g, correspondente a aproximadamente 0,89% da massa inicial, enquanto a fração não magnética totalizou 826,02 g. Esse resultado evidencia a baixa resposta magnética do material quando submetido a campos de baixa intensidade, indicando que apenas uma pequena parcela dos minerais presentes apresenta suscetibilidade magnética suficiente para ser recuperada nessa condição.

Observa-se na Figura 6 que a fração magnética de 2A apresenta composição marcada pela predominância de hornblenda (26,5%), associada a albite (23,3%) e quartzo (22,0%), refletindo uma mistura equilibrada entre fases máficas e félsicas. A presença significativa de epidoto (14,0%) e biotita (11,2%) indica enriquecimento relativo em minerais portadores de ferro e magnésio, o que explica a resposta magnética observada durante o ensaio, ainda que de forma limitada. A identificação de espessartina (2,9%) sugere influência de condições metamórficas de médio grau, típicas de ambientes associados a rochas encaixantes de corpos pegmatíticos (Mat, 2024).

Figura 6 - Difratoograma de raios X da fração magnética obtida a 2A.



Os resultados de FRX corroboram a interpretação mineralógica obtida por DRX, evidenciando teores elevados de Fe_2O_3 (18,83%), CaO (8,98%) e MgO (0,34%), associados à presença de anfibólios, epidoto e biotita. O teor significativo de SiO_2 (51,44%) confirma a

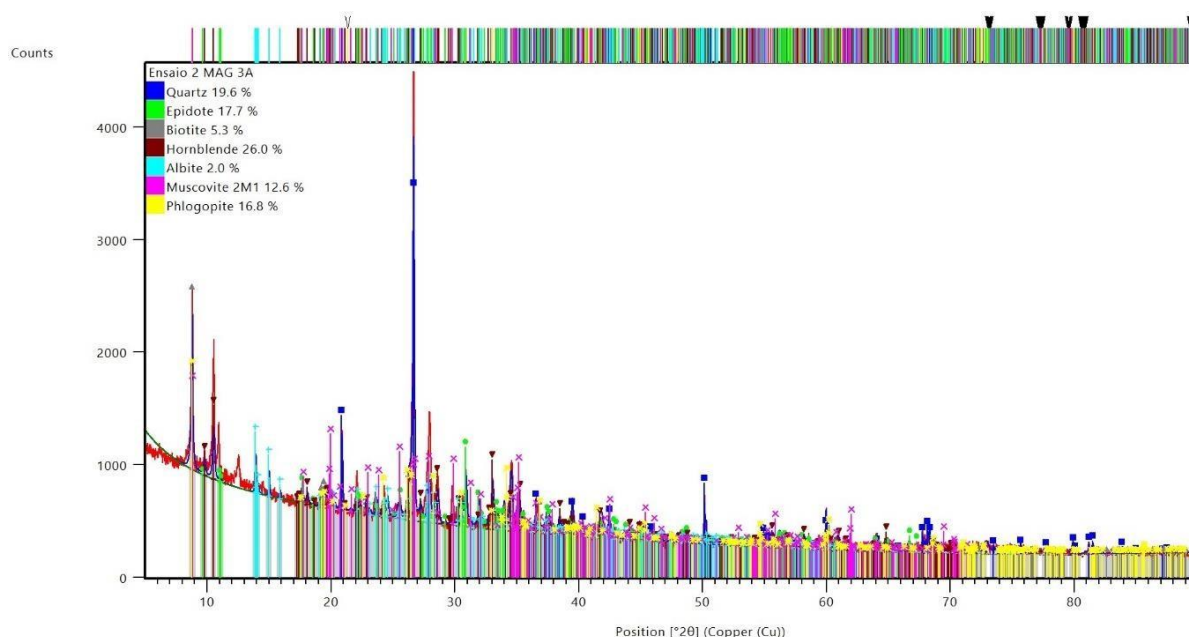
incorporação parcial de fases félsicas na fração magnética, atribuída à associação textural entre minerais máficos e a matriz quartzo-feldspática.

5.2.3 Ensaio 2 – Corrente de 3A

Esse ensaio é caracterizado pela expressiva presença de minerais ferromagnesianos, o que reflete a maior eficiência do processo de separação magnética sob corrente de 3A, quando comparada ao ensaio anterior. A hornblenda (26,0%) constitui a fase dominante, acompanhada por epidoto (17,7%), flogopita (16,8%), moscovita (12,6%) e biotita (5,3%), indicando elevada concentração de minerais com maior suscetibilidade magnética. Esse comportamento está diretamente associado ao aumento da intensidade do campo aplicado, que resultou em acréscimo da massa da fração magnética para 13,25 g, correspondente a 1,54% da massa inicial, enquanto a fração não magnética totalizou 844,36 g.

As fases félsicas apresentam participação auxiliar nessa fração, com quartzo ocorrendo em proporção moderada (19,6%) e albita em teor reduzido (2,0%), evidenciando a segregação preferencial dos minerais não magnéticos. Dessa forma, a composição mineralógica obtida confirma que minerais micáceos e anfibólios são progressivamente concentrados à medida que a intensidade do campo magnético é elevada.

Figura 7 - Difratograma de raios X da fração magnética obtida a 3A.



A análise por FRX reforça essa interpretação, com Fe_2O_3 atingindo 20,30%, além de teores elevados de CaO (10,39%) e presença de MgO (0,33%), compatíveis com a concentração

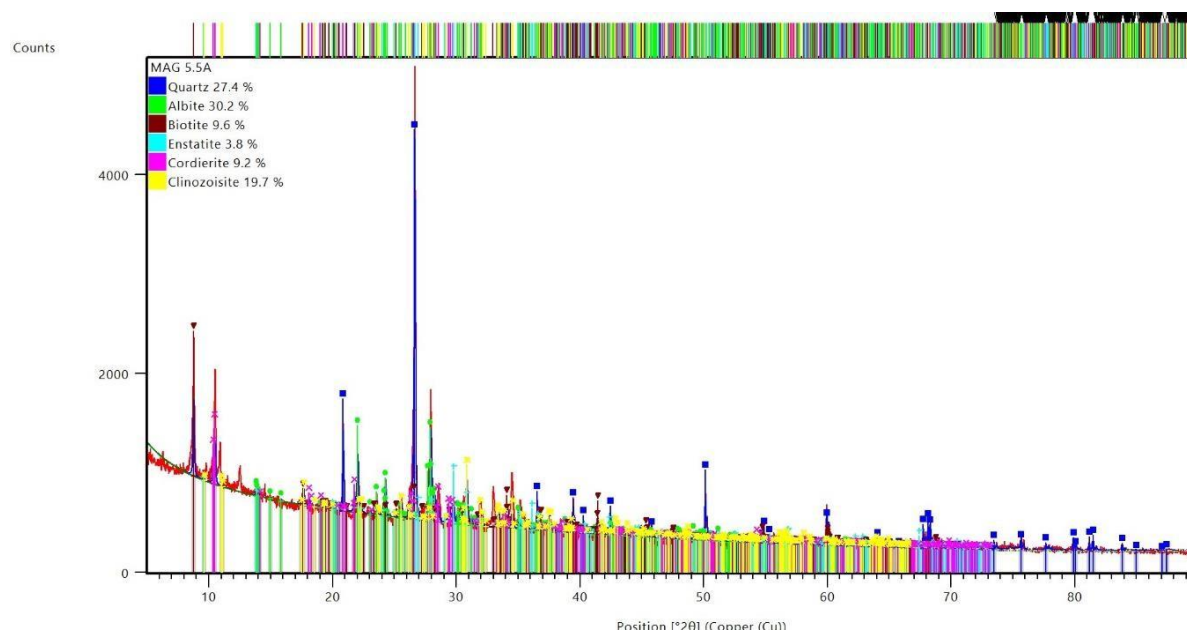
de anfibólios, epidoto e micas ferromagnesianas. O teor reduzido de SiO_2 (49,70%), em comparação à amostra global, confirma a eficiência do campo magnético na remoção seletiva da ganga félsica.

5.2.4 Ensaio 3 – Corrente de 5,5A

Sob corrente de 5,5 A, a fração magnética apresentou massa de 16,15 g, correspondente a 1,98% da massa inicial, enquanto a fração não magnética totalizou 798,43 g. Em comparação ao ensaio anterior, observa-se um aumento na recuperação mássica da fração magnética, indicando maior captura de partículas pelo campo aplicado. Entretanto, esse aumento não está associado a um ganho de seletividade, sugerindo que, nessa intensidade, passam a ser retidos não apenas minerais ferromagnesianos, mas também partículas com menor suscetibilidade magnética ou associadas texturalmente à matriz félsica.

O difratograma do ensaio (Figura 8) revela uma composição equilibrada entre minerais félsicos e máficos, com predomínio de albita (30,2%) e quartzo (27,4%). A presença significativa de clinozoisita (19,7%) indica processos de alteração cálcica associados a condições metamórficas (Camargos, 2025), enquanto a ocorrência de biotita (9,6%) e cordierita (9,2%) reforça a complexidade da associação mineralógica. A enstatita (3,8%) ocorre como fase acessória, sugerindo contribuição de minerais máficos menos abundantes.

Figura 8 - Difratograma de raios X da fração magnética obtida a 5,5A.



A análise por FRX confirma essa associação, com Fe_2O_3 atingindo 17,05%, valor superior ao observado no ensaio 4, associado a teores elevados de CaO (9,01%) e Al_2O_3

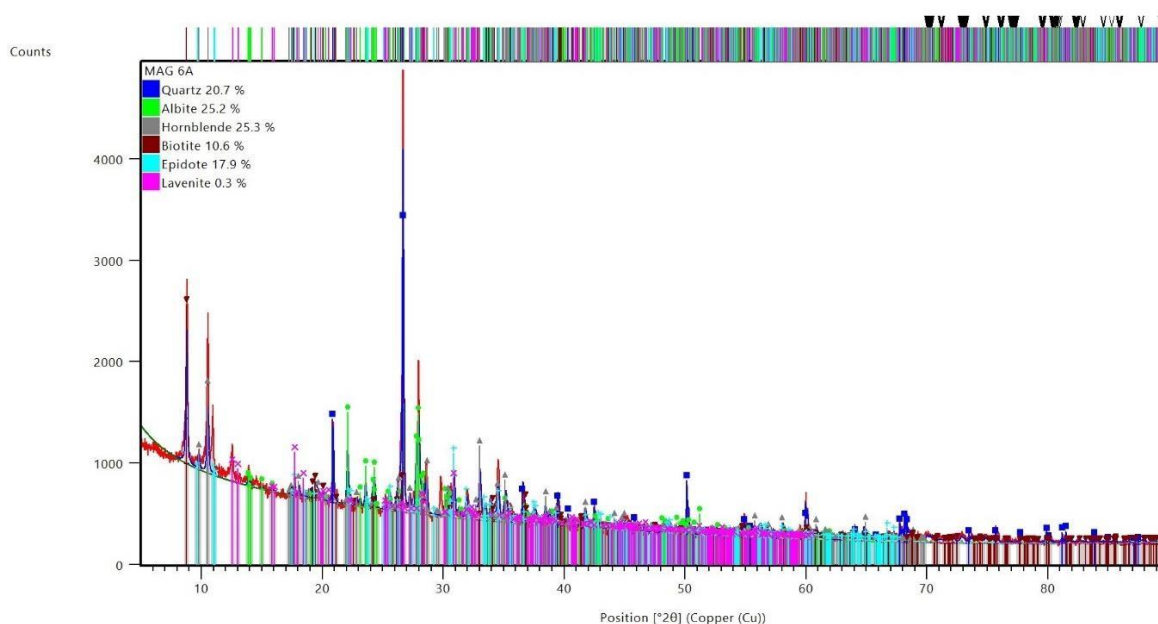
(11,25%), compatíveis com a presença de clinozoisita, biotita e feldspatos. O teor de SiO₂ (53,04%), embora ainda elevado, apresenta redução em relação aos ensaios anteriores, indicando maior seletividade do processo. Esse conjunto mineralógico caracteriza essa fração como um estágio intermediário de concentração magnética, com aumento do enriquecimento em minerais ferromagnesianos, porém com potencial limitado para concentração direta dos minerais de interesse econômico.

5.2.5 Ensaio 4 – Corrente de 6 A

No ensaio conduzido sob corrente de 6A, a massa da fração magnética foi de 14,39 g, correspondente a 1,76% da massa inicial, enquanto a fração não magnética atingiu 803,21 g. Observa-se uma leve redução na recuperação mássica em relação ao ensaio anterior, o que sugere que apenas uma pequena parcela dos minerais presentes na amostra apresenta suscetibilidade suficiente para ser separada sob essa intensidade de campo magnético.

O difratograma do ensaio com corrente de 6A (Figura 9) é caracterizado por proporções semelhantes de hornblenda (25,3%) e albite (25,2%), associadas a quartzo (20,7%) e epidoto (17,9%). A biotita (10,6%) também apresenta participação significativa, reforçando o caráter ferromagnesiano dessa fração e confirmando a seletividade do processo de separação magnética. A ocorrência pontual de lavenita (0,3%) indica a presença de fases acessórias raras, sem impacto significativo no comportamento magnético global.

Figura 9 - Difratograma de raios X da fração magnética obtida a 6A.



Os resultados de FRX evidenciam Fe_2O_3 elevado (18,86%), associado a CaO (9,45%) e MgO (2,18%), confirmando a concentração preferencial de minerais máficos e ferromagnesianos nessa fração. O teor de SiO_2 (49,99%) é inferior ao observado nos ensaios anteriores, o que indica maior seletividade magnética. Contudo, a ausência de aumento significativo na recuperação mássica sugere que a elevação do campo para 6A não resulta em ganhos adicionais expressivos, caracterizando essa fração como um concentrado magnético típico e coerente com a tendência observada ao longo da sequência experimental.

Com o objetivo de facilitar a comparação entre os ensaios de separação magnética e evidenciar a redistribuição do ferro em função das diferentes intensidades de campo, a Tabela 3 apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos, incluindo as recuperações mássicas e os teores de Fe_2O_3 determinados por FRX.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de separação magnética.

Ensaio	Corrente elétrica (A)	Não magnético (g)	Magnético (g)	Recuperação mássica (%)	Teor de Fe_2O_3 (%)
Global	-	-	-	-	2,64
1	2,0	826,02	7,40	0,89	18,83
2	3,0	844,36	13,25	1,54	20,30
3	5,5	798,43	16,15	1,98	17,05
4	6,0	803,21	14,39	1,76	18,86

Fonte: Autor, 2026

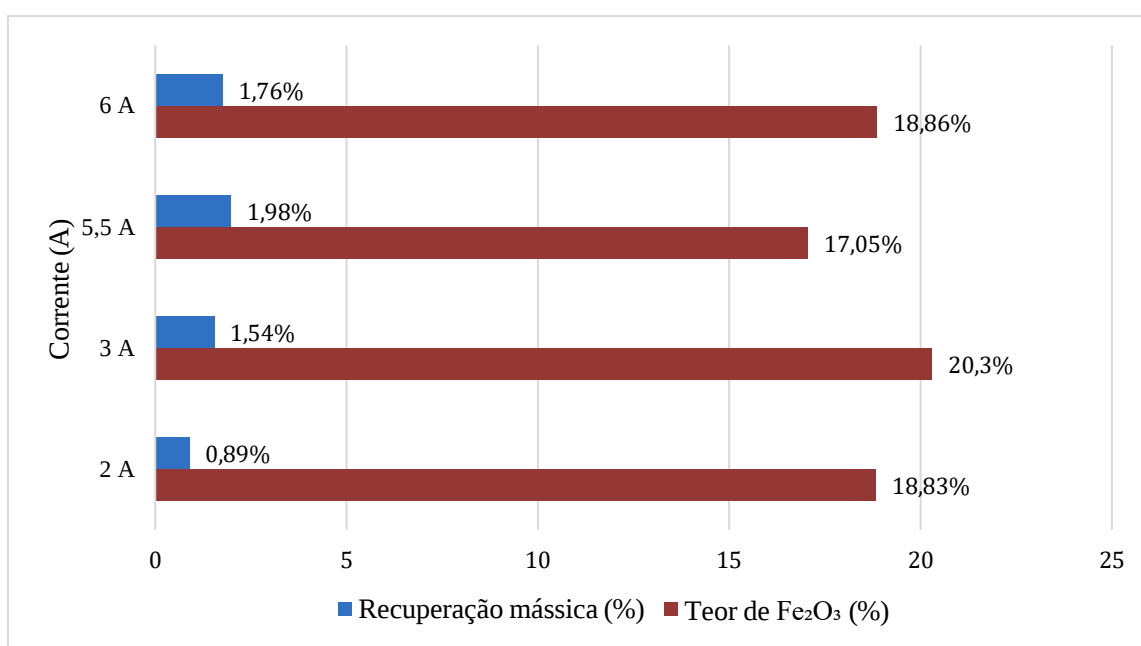
Para complementar a análise dos resultados dos ensaios de separação magnética, a Tabela 4 apresenta uma síntese das principais fases minerais identificadas nas frações magnéticas para cada intensidade de corrente, juntamente com os respectivos teores de Fe_2O_3 determinados por FRX. De forma complementar, a Figura 10 mostra a variação da recuperação mássica e do teor de Fe_2O_3 em função da corrente aplicada, permitindo uma avaliação comparativa do desempenho do processo sob diferentes intensidades de campo magnético. O gráfico possibilita a identificação das tendências operacionais, evidenciando o compromisso entre seletividade e recuperação mássica.

Tabela 4 - Fases minerais identificadas nas frações magnéticas e teores de Fe_2O_3

Ensaio	Corrente aplicada (A)	Fases minerais identificadas	Teor de Fe_2O_3 (%)
1	2,0 A	Quartzo, hornblenda, albita, epidoto, biotita e espessartita	18,83
2	3,0 A	Hornblenda, quartzo, epidoto, flogopita, moscovita, biotita e albita	20,3
3	5,5 A	Albita, quartzo, clinozoisita, biotita, cordierita e enstatita	17,05
4	6,0 A	Hornblenda, albita, quartzo, epidoto, biotita e lavenita	18,86

Fonte: Autor, 2026

Figura 10 - Recuperação mássica e teor de Fe_2O_3 em função da corrente aplicada



Fonte: Autor, 2026

Observa-se que as frações magnéticas obtidas apresentaram recuperações mássicas relativamente baixas em todas as condições avaliadas, inferiores a 2%, o que confirma a baixa suscetibilidade magnética do material, característica típica de minérios pegmatíticos com predominância de minerais félsicos e litíferos.

O maior teor de Fe_2O_3 foi registrado na corrente de 3A (20,30%), indicando maior seletividade do processo para a concentração de minerais ferromagnesianos nessa condição. Para correntes superiores, verifica-se um aumento da recuperação mássica acompanhado por uma redução no teor de Fe_2O_3 , evidenciando a captura progressiva de partículas com menor suscetibilidade magnética e, conseqüentemente, a diminuição da seletividade do processo.

Esse comportamento demonstra a existência de um compromisso entre recuperação mássica e qualidade do concentrado, sendo a condição de 3A a que apresentou o melhor desempenho global para a remoção seletiva de minerais portadores de ferro.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo geral a realização da caracterização mineralógica e magnética de uma amostra de minério de lítio, visando compreender o comportamento dos minerais portadores de lítio e dos minerais de ganga, bem como avaliar o potencial de aplicação da separação magnética como etapa preliminar nos processos de beneficiamento mineral. Para isso, foram integradas análises granulométricas, ensaios de separação magnética sob diferentes intensidades de campo e técnicas de caracterização mineralógica e química, por meio de DRX e FRX.

Os resultados obtidos permitiram atender aos objetivos específicos propostos. A identificação do espodumênio e de seus minerais associados — quartzo, feldspatos e micas — realizada por meio do DRX, evidenciou uma mineralogia típica de pegmatitos litiníferos, com predominância de quartzo e feldspatos na matriz félsica, associados a minerais ferromagnesianos como hornblenda, biotita e epidoto, além da presença de espodumênio como principal fase de interesse econômico. Essa caracterização confirmou a associação íntima entre os minerais litiníferos e a matriz quartzo-feldspática, fator determinante para o comportamento do material durante os processos de concentração.

A composição química da amostra, determinada por FRX, confirmou os resultados mineralógicos, indicando elevados teores de SiO_2 (73,27%) e Al_2O_3 (11,86%), compatíveis com a predominância de quartzo e feldspatos, e variações significativas nos teores de Fe_2O_3 (2,64%), MgO (3,85%) e MnO (0,33%) ao longo das frações magnéticas. A integração entre DRX e FRX mostrou-se fundamental para a validação das fases identificadas e para a interpretação consistente da associação mineralógica presente na amostra.

Os ensaios de separação magnética demonstraram que o aumento da intensidade do campo magnético promoveu a concentração progressiva de minerais ferromagnesianos nas frações magnéticas. Em contrapartida, os minerais félsicos e o espodumênio, permaneceram predominantemente nas frações não magnéticas, em função de seu comportamento essencialmente diamagnético. Esses resultados indicam que a separação magnética é eficiente para a remoção seletiva de minerais portadores de ferro e para a redução do teor global de Fe_2O_3 do material, ainda que não resulte na concentração direta do mineral de interesse econômico, configurando-se como uma etapa preliminar potencial de beneficiamento capaz de reduzir a ganga paramagnética e melhorar o desempenho de processos subsequentes, como flotação ou separação gravítica, ao aumentar a seletividade e diminuir o volume de material a ser beneficiado. Nesse contexto, observa-se um compromisso entre seletividade e recuperação mássica, sendo que o ensaio conduzido sob corrente de 3,0 A apresentou o melhor desempenho global, por associar remoção eficiente dos minerais ferromagnesianos a uma recuperação mássica mais representativa, indicando essa condição como a mais adequada dentre as avaliadas.

Dessa forma, conclui-se que a caracterização mineralógica e magnética realizada forneceu subsídios técnicos relevantes para a compreensão do comportamento do minério estudado e para a avaliação de rotas de beneficiamento adequadas. O trabalho evidencia a importância da integração entre técnicas mineralógicas e químicas na caracterização tecnológica de minérios, especialmente em depósitos pegmatíticos litiníferos, nos quais a associação mineralógica exerce papel determinante na eficiência dos processos de concentração.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos complementares de liberação mineral, análises microscópicas detalhadas e a avaliação de outras rotas de beneficiamento, como a flotação e a concentração gravítica, visando otimizar a recuperação dos minerais de lítio e aprofundar o entendimento do comportamento tecnológico do material analisado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, João Batista Ribeiro de; PERES, Antônio Eduardo de Souza; FREITAS, Sérgio Leandro de; BARROSO, Welder Gomes. Caracterização tecnológica do minério de lítio do pegmatito da Borborema Pegmatítica – Paraíba – Brasil. Revista Escola de Minas, 2019.

ARAÚJO, Gleiciane Alves. Caracterização mineralógica e geoquímica de pegmatitos litiníferos do Complexo Ipueira–Medrado, nordeste da Bahia. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Cruz das Almas, 2022.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; SAMPAIO, João Alves. Lítio. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas (org.). Rochas e minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 687–705.

CAMARGOS, Gustavo Mariano de Freitas. Evolução hidrotermal no alvo Carrapicho Norte: um sistema orogênico multiepisódico no depósito aurífero de Papagaios, greenstone belt Pitangui, Minas Gerais. 2025. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

CARDOSO-FERNANDES, Joana *et al.* Characterization of lithium (Li) minerals from the Fregeneda–Almendra region through laboratory spectral measurements: a comparative study. In: SPIE Remote Sensing. Bellingham: SPIE, 2020.

CARVALHO, Milena dos Santos; PEREIRA, Caio César Melo; PERES, Antônio Eduardo de Souza; BARROSO, Welder Gomes. Efeito da granulometria da alimentação na flotação de lítio proveniente de um pegmatito do nordeste brasileiro. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 74, n. 3, p. 1–8, 2021.

COSTA, L. F.; MOURA, R. S.; OLIVEIRA, P. M. Depósitos pegmatíticos e potencial do lítio em Minas Gerais. Revista Brasileira de Geociências, v. 50, n. 2, 2020.

ELIOTÉRIO, Adler Alves *et al.* Caracterização mineralógica de pegmatitos litiníferos da região de Araçuaí–MG. Revista Eletrônica Engenharia de Interesse Social, v. 1, n. 4, p. 1-14, 2019.

HASAN, M. M. *et al.* Advancing energy storage: The future trajectory of lithium-ion battery technologies. Journal of Energy Storage, v. 120, p. 116511, 2025.

HEAVY MINERALS AND MAGNETIC SEPARATION. Using mineralogy to identify the source of a sample. 2024.

IEA – International Energy Agency. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 18 nov. 2025.

KAHN, H.; TASSINARI, M.; ULSEN, C. Caracterização tecnológica de matérias-primas minerais: separações minerais em laboratório. São Paulo: Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 2013.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; SAMPAIO, J. A. Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 756 p.

MAT, M. Espessartina: Propriedades, Formação, Localização - Ciência Geológica. Disponível em: <<https://geologyscience.com/pt/gemstone/spessartine/>>. Acesso em: 14 jan. 2026.

MILAGRE, João Pedro Silva. Revisão histórica e tecnológica das baterias enfatizando os modelos de lítio e desenvolvimento de um protótipo para o carregamento simultâneo de duas células de li-íon. 2023. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

MORAIS, André Luiz *et al.* Caracterização mineralógica integrada aplicada a minérios complexos: implicações para o beneficiamento mineral. Brazilian Journal of Geology, São Paulo, v. 53, n. 1, p. 1–18, 2023.

PÖLLMANN, Herbert; KÖNIG, Uwe. Monitoring of lithium contents in lithium ores and concentrate-assessment using x-ray diffraction (XRD). Minerals, v. 11, n. 10, p. 1058, 2021.

OLIVEIRA, Rodrigo Carneiro de. Flotação de minério de Li com óleo de soja: efeito de variáveis físico-químicas e de processo. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2024.

TIMICH, Marco. Process mineralogy of a lithium enriched pegmatite combining mineral separation and SEM based automated mineralogy. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2023.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral Commodity Summaries 2026: Lithium. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2026.

ZORZAL, Caroline Belisario; SILVA, José Margarida da; JAQUES, Daniel Silva; SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa. An overview of lithium mining in Brazil: From artisanal extraction to large-scale production. *Resources Policy*, 2025.