



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



**ARTHUR SILVA DE OLIVEIRA**

**DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DO ESPODUMÊNIO EM UMA  
AMOSTRA DE PEGMATITO LITINÍFERO**

**OURO PRETO**  
**2026**

**ARTHUR SILVA DE OLIVEIRA**

**DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DO ESPODUMÊNIO EM UMA  
AMOSTRA DE PEGMATITO LITINÍFERO**

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.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Janine Rodrigues Figueiredo

**OURO PRETO  
2026**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Arthur Silva de Oliveira**

### DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DO ESPODUMÊNIO EM UMA AMOSTRA DE PEGMATITO LITÍFERO

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 27 de fevereiro de 2026

#### Membros da banca

Dr.<sup>a</sup> Janine Rodrigues Figueiredo - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
M. Sc. Tamiris Fonseca de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto  
M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva - 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 27/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2026, às 13:15, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1066725** e o código CRC **757E35BA**.

Aos meus pais, Sebastião José e Maria Ivete, e à minha irmã, Adna, por todo o amor, apoio e dedicação. Honro e agradeço cada esforço de vocês.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria, e à Nossa Senhora, por sua intercessão e proteção constantes, por me concederem saúde, força, perseverança e serenidade ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, especialmente nos momentos de maior desafio.

Aos meus pais, Sebastião José e Maria Ivete, à minha irmã, Adna, à minha namorada, Mariana, e a toda a minha família, pelo amor incondicional, apoio constante, incentivo em todos os momentos, compreensão, paciência e carinho demonstrados durante todo o período da graduação, sendo pilares fundamentais para a minha caminhada e para a conclusão desta etapa tão significativa da minha formação.

À minha orientadora, Janine Figueiredo, pela orientação dedicada, paciência, incentivo constante e pelas valiosas contribuições ao longo de toda a elaboração deste trabalho, tornando-se não apenas referência técnica, mas também apoio e inspiração para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos professores, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia de Minas, em especial Allan, Antônio, Érica, Hernani, Mariana e Tatiana, pelos ensinamentos, apoio e inspiração compartilhados ao longo da graduação, que contribuíram de maneira significativa não apenas para a minha formação acadêmica e profissional, mas também para o meu desenvolvimento pessoal. Agradeço também a Paulo e Tamiris, que, para além de colegas na Samarco, tornaram-se amigos, pelo apoio, amizade e pela parceria construída ao longo dessa jornada.

À Universidade Federal de Ouro Preto, à gloriosa Escola de Minas e à Fundação Gorceix, pela infraestrutura, apoio acadêmico e pelas oportunidades oferecidas ao longo do curso, fundamentais para a minha formação.

Aos meus colegas e amigos, em especial Altamiro, Andrey, Emilcy, Lóren, Marcos Taylor, Pedro, Rafael e Sandylla, que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente, seja por meio de discussões técnicas, apoio moral, amizade ou companheirismo, durante toda a graduação.

Por fim, a todos que contribuíram, mesmo que de forma indireta, durante a graduação, deixo meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A crescente demanda por lítio, impulsionada pela expansão do setor de baterias e pela transição energética global, tem intensificado a busca por alternativas que promovam maior eficiência e sustentabilidade no aproveitamento de recursos minerais. Nesse contexto, a reavaliação tecnológica de coprodutos de plantas de beneficiamento representa uma oportunidade estratégica para recuperação de minerais de interesse, agregação de valor e redução de passivos ambientais. O presente trabalho tem por finalidade determinar o grau de liberação do espodumênio em uma amostra de pegmatito litífero proveniente de coprodutos de uma planta de concentração gravítica localizada na região de Nazareno, Minas Gerais. Para isso, foram realizadas caracterizações mineralógica, granulométrica, química e física da amostra, seguidas de ensaios de separação em líquido denso com bromofórmio para diferentes faixas granulométricas (+850; -850/+500; -500/+297; -297/+149; -149/+74; e -74  $\mu\text{m}$ ). A caracterização mineralógica por DRX revelou predominância de minerais de ganga, principalmente quartzo, albita, microclina e muscovita, enquanto o espodumênio ocorreu em menor proporção. Os ensaios densitários mostraram que, nas granulometrias mais grossas (acima de 297  $\mu\text{m}$ ), o espodumênio concentra-se preferencialmente na fração afundada, apresentando teores de  $\text{Li}_2\text{O}$  superiores a 4% e distribuições acima de 90%, o que indica um elevado grau de liberação nestas faixas. Em contrapartida, nas granulometrias inferiores a 149  $\mu\text{m}$ , observou-se diminuição da seletividade, atribuída à presença de partículas mistas e ultrafinas, o que compromete a eficiência da separação. De forma geral, os resultados demonstram que a liberação ideal do espodumênio ocorre predominantemente acima de 297  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-Chave:** Espodumênio; Grau de Liberação; Líquido Denso; Pegmatito Litífero; Separação Densitária.

## ABSTRACT

The growing demand for lithium, driven by the expansion of the battery sector and the global energy transition, has intensified the search for alternatives that promote greater efficiency and sustainability in the utilization of mineral resources. In this context, the technological reassessment of tailings from mineral processing plants represents a strategic opportunity for the recovery of valuable minerals, value addition, and the reduction of environmental liabilities. The present study aims to determine the degree of liberation of spodumene in a lithium-bearing pegmatite sample derived from tailings of a gravity concentration plant located in the Nazareno region, Minas Gerais, Brazil. To this end, mineralogical, granulometric, chemical, and physical characterizations of the sample were carried out, followed by dense liquid separation tests using bromoform for different particle size fractions (+850; -850/+500; -500/+297; -297/+149; -149/+74; and -74  $\mu\text{m}$ ). Mineralogical characterization by X-ray diffraction (XRD) revealed a predominance of gangue minerals, mainly quartz, albite, microcline, and muscovite, while spodumene occurred in smaller proportions. The densimetric tests showed that, in the coarser size fractions (above 297  $\mu\text{m}$ ), spodumene preferentially concentrates in the sink fraction, presenting  $\text{Li}_2\text{O}$  grades above 4% and distributions exceeding 90%, which indicates a high degree of liberation in these ranges. In contrast, in particle sizes below 149  $\mu\text{m}$ , a reduction in selectivity was observed, attributed to the presence of composite and ultrafine particles, which compromises separation efficiency. Overall, the results demonstrate that the optimal liberation of spodumene occurs predominantly above 297  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** Spodumene; Degree of Liberation; Heavy Liquid; Lithium-Bearing Pegmatite; Density Separation.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Distribuição das principais áreas pegmatíticas no Brasil.....	21
Figura 2 - Amostra homogeneizada e quarteada.....	23
Figura 3 - Amostra homogeneizada e quarteada.....	24
Figura 4 - Ensaio de separação em líquido denso (bromofórmio).....	27
Figura 5 - Gráfico de distribuição granulométrica da amostra do coproduto de minério de lítio. 32	
Figura 6 - Análise mineralógica por DRX da amostra global.....	37
Figura 7 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +20#.....	38
Figura 8 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +20#.....	39
Figura 9 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +32#.....	40
Figura 10 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +32#.....	40
Figura 11 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +48#.....	41
Figura 12 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +48#.....	42
Figura 13 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +100#.....	43
Figura 14 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +100#.....	43
Figura 15 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +200#.....	44
Figura 16 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +200#.....	45
Figura 18 - Análise mineralógica por DRX do material afundado -200#.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica da amostra do coproduto de minério de lítio.....	31
Tabela 2 - Principais parâmetros definidos pela técnica BET para a amostra de coproduto de minério de lítio.....	32
Tabela 3 - Distribuição dos produtos flutuado e afundado, resultantes da separação em meio denso (bromofórmio, $d = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ), de acordo com a faixa granulométrica.....	33
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de separação em meio denso, por faixa granulométrica.....	34
Tabela 5 - Densidade específica e critério de concentração (CC) em bromofórmio.....	36
Tabela 6 - Resultados da análise química dos demais elementos e/ou compostos do produto afundado obtido na separação em líquido denso, por faixa granulométrica.....	36

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
3.1 Caracterização mineralógica.....	13
3.1.1 Análise mineralógica qualitativa.....	13
3.1.2 Análise mineralógica semiquantitativa.....	14
3.1.3 Determinação do grau de liberação.....	15
3.2 Liberação mineral: fundamentos e importância.....	16
3.3 Métodos de determinação do grau de liberação.....	17
3.4 Pegmatitos litiníferos e mineralogia do espodumênio.....	18
3.5 Contexto brasileiro.....	20
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
4.1 Amostra.....	23
4.2 Determinação da densidade real de sólidos.....	24
4.3 Caracterização granulométrica da amostra global.....	25
4.4 Determinação da área superficial e porosidade da amostra global - BET.....	26
4.5 Separação em líquido denso.....	26
4.6 Análise química pelo método ICP.....	28
4.7 Caracterização mineralógica - Difratomia de raios X.....	28
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>30</b>
5.1 Determinação da densidade da amostra global.....	30
5.2 Caracterização granulométrica.....	30
5.3 Determinação da área superficial e porosidade da amostra global - BET.....	32
5.4 Separação em líquido denso.....	33
5.5 Análise química pelo método ICP.....	36
5.6 Caracterização mineralógica - Difratomia de raios X.....	37
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O lítio consolidou-se como um dos metais estratégicos do século XXI, em função de seu papel na transição energética global. As baterias de íons de lítio representam atualmente a principal tecnologia para o armazenamento de energia em veículos elétricos e em sistemas integrados a fontes renováveis. De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2023), a demanda mundial pelo metal tende a crescer rapidamente nas próximas décadas, impulsionada pela eletrificação da frota automotiva e pela necessidade de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Essa tendência é reforçada por dados do United States Geological Survey (USGS, 2024), que apontam para a expansão contínua da produção global, acompanhada pelo avanço das indústrias de mobilidade elétrica e de armazenamento de energia.

No Brasil, os pegmatitos litiníferos têm ganhado relevância crescente diante do aumento da demanda internacional por minerais críticos. Esses depósitos ocorrem predominantemente nas regiões Nordeste, Sudeste e parte do Centro-Oeste, constituindo importantes alvos de exploração mineral. Estudos apontam concentrações significativas de espodumênio, lepidolita e petalita, minerais fundamentais para a cadeia produtiva do lítio (CPRM, 2020). O que evidencia o crescimento expressivo nos requerimentos e concessões de pesquisa relacionados ao metal, o que reforça a necessidade de estudos que subsidiem o aproveitamento técnico e econômico desses recursos (ANM, 2024).

A caracterização tecnológica de minerais, aliada à determinação do grau de liberação, desempenha papel fundamental no aumento do conhecimento geológico e metalúrgico desses recursos, constituindo uma etapa essencial no processo de conversão de recursos minerais em reservas provadas. Ao fornecer informações detalhadas sobre a composição mineralógica, as associações texturais, a distribuição granulométrica e o comportamento do minério nos processos de beneficiamento, esses estudos permitem avaliar com maior precisão a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do depósito. Em particular, o conhecimento do grau de liberação subsidia a definição das rotas de processamento, o dimensionamento adequado das etapas de cominuição e de concentração, bem como a estimativa realista de recuperações metalúrgicas e dos teores de concentrado.

Dentre os métodos de caracterização tecnológica de minérios, o ensaio em líquido denso destaca-se como uma ferramenta prática e acessível para a avaliação do grau de liberação. Com base na diferença de densidade entre minerais valiosos e ganga, esse ensaio permite inferir a proporção de partículas liberadas, parcialmente liberadas ou ainda associadas. A análise das frações afundadas e flutuadas fornece informações essenciais para a compreensão do comportamento do minério nas operações de beneficiamento, especialmente em ambientes laboratoriais em que técnicas automatizadas de determinação do grau de liberação não estão disponíveis, como MLA (Mineral Liberation Analyzer) e QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy), (Amstutz, 1975; Wills; Chaves, 2021).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe determinar o grau de liberação do espodumênio em uma amostra de coproduto de uma planta de concentração gravítica de tantalita e cassiterita por meio de ensaios em líquido denso. A partir desses resultados, busca-se prever o comportamento dos minerais de espodumênio em relação aos minerais de ganga em um processo de separação em meio denso ou em outro método de separação densitária.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Determinar o grau de liberação do espodumênio em uma amostra de coproduto de uma planta de concentração gravítica por meio de ensaios em líquido denso.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos e desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar fisicamente, mineralogicamente e quimicamente o minério;
- Realizar ensaios de separação em líquido denso em diferentes frações granulométricas (+850; -850/+500; -500/+297; -297/+149; -149/+74; e -74  $\mu\text{m}$ );
- Avaliar a relação entre densidade, proporção afundado/flutuado e o grau de liberação do espodumênio.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Caracterização mineralógica**

##### **3.1.1 Análise mineralógica qualitativa**

A caracterização mineralógica de minérios, com foco no beneficiamento, deve priorizar os estudos em microscópio óptico polarizante, uma vez que essa abordagem permite, mesmo em fases exploratórias, compreender o comportamento dos minerais de interesse econômico e da ganga frente às operações de tratamento mineral. A identificação baseia-se na análise das propriedades ópticas dos minerais transparentes, como cor, pleocroísmo, extinção, relevo, clivagens, fraturas, birrefringência, geminações e caráter óptico, bem como na avaliação das propriedades dos minerais opacos, incluindo isotropia, anisotropia e reflectância, esta última determinada por medições da luz refletida. Nesse contexto, os estudos iniciam-se a partir de amostras representativas do minério bruto, com a preparação de lâminas delgadas e seções polidas para análise microscópica, sendo a metodologia ajustada conforme a faixa granulométrica do material, desde observações em lupa binocular até microscopia óptica, podendo ser complementada, quando necessário, por técnicas como a difratometria de raios X e análises químicas em frações mais finas, assegurando uma identificação mineralógica adequada ao suporte dos processos de beneficiamento (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

Além disso, a caracterização mineralógica pode ser realizada por meio de diferentes técnicas analíticas, destacando-se os estudos das propriedades ópticas com auxílio de lupa binocular, microscopia de luz transmitida e de luz refletida. De forma complementar, empregam-se métodos instrumentais como a difratometria de raios X, a microsonda eletrônica, a microscopia eletrônica de varredura associada à análise por energia dispersiva de raios X, bem como sistemas de análise de imagens. Adicionalmente, outras técnicas podem ser utilizadas para fins específicos, incluindo análises espectroscópicas no infravermelho, observações sob luz ultravioleta, espectroscopia Mössbauer, análises termodiferenciais e termogravimétricas, radiografia e procedimentos de ataque químico rápido (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

No âmbito da caracterização mineralógica e tecnológica, podem ser empregadas diferentes técnicas analíticas, incluindo a microsonda eletrônica e a microscopia eletrônica de varredura associada a sistemas de análise por energia dispersiva de raios X,

que permitem a identificação das fases minerais e a determinação da composição química pontual. Paralelamente, a difratometria de raios X é amplamente utilizada para a identificação estrutural dos minerais, enquanto os analisadores de imagem permitem a quantificação de parâmetros texturais e morfológicos. Complementarmente, as análises químicas quantitativas podem ser realizadas por métodos clássicos de via úmida, como gravimetria, titulometria, volumetria e colorimetria, bem como por técnicas instrumentais, incluindo espectrografia óptica de emissão, espectrometria de absorção atômica, fluorescência de raios X e espectrometria de plasma (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

### **3.1.2 Análise mineralógica semiquantitativa**

A caracterização mineralógica aplicada ao beneficiamento de minérios deve contemplar a quantificação de seus constituintes, incluindo tanto os minerais de interesse econômico quanto os minerais de ganga. Essa informação é fundamental para o desenvolvimento e a otimização dos processos de tratamento mineral. Um dos principais desafios dessa etapa está associado à garantia da representatividade da amostra, considerando a reduzida massa analisada em laboratório em relação ao volume total da jazida, bem como à necessidade de minimizar erros operacionais ao longo do procedimento. A quantificação pode ser realizada por métodos semiquantitativos, baseados em observações microscópicas e em lupa binocular, sendo consideravelmente aprimorada pelo uso de analisadores de imagem associados à microscopia eletrônica de varredura. Para assegurar resultados confiáveis, a alíquota do minério deve ser criteriosamente preparada desde a amostragem até os ensaios laboratoriais, observando-se critérios de homogeneidade, conhecimento prévio do teor do mineral valioso ou do elemento de interesse e estimativas da granulometria necessária para a adequada liberação do mineral em relação à ganga (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

A amostra representativa do minério, com granulometria inferior a 1,68 mm, deve ser classificada em faixas granulométricas padronizadas, de modo a viabilizar os ensaios de concentração, sendo comumente adotados os intervalos de 1,68 mm a 590  $\mu\text{m}$ , de 590 a 210  $\mu\text{m}$ , de 210 a 37  $\mu\text{m}$  e inferiores a 37  $\mu\text{m}$ . Com o objetivo de aumentar a seletividade dos produtos e a confiabilidade dos cálculos, essas frações podem ser submetidas à separação em meio denso, utilizando líquidos de diferentes densidades, como bromofórmio e iodeto de metileno, podendo os produtos afundados ser

posteriormente concentrados por métodos eletromagnéticos. Os materiais resultantes dessas separações, correspondentes às frações menos densas, mais densas, magnéticas e não magnéticas, são identificados por microscopia óptica polarizante e por lupa binocular, e suas proporções são estimadas por métodos de contagem ao microscópio. Os resultados volumétricos obtidos são convertidos em percentuais em massa a partir das densidades teóricas dos minerais, permitindo, assim, a determinação da composição mineralógica semiquantitativa do minério (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

### **3.1.3 Determinação do grau de liberação**

A eficiência dos processos de beneficiamento está diretamente associada ao grau de liberação dos minerais, que depende da completa individualização dos grãos. A liberação pode ser definida como a porcentagem do mineral de interesse econômico que ocorre, em determinada faixa granulométrica, sob a forma de partículas livres, sendo, em alguns casos, naturalmente presente, como em depósitos aluvionares, mas, na maioria dos minérios, resultante das etapas de britagem e moagem. Esse processo é controlado por fatores como o tamanho, a forma e o intercrescimento dos grãos, as coesões internas e intergranulares, os tipos de associações mineralógicas e as proporções relativas entre os minerais, estando, portanto, diretamente relacionado à textura original da rocha mineralizada. A estimativa do grau de liberação pode ser realizada em diferentes níveis de precisão, por meio de ensaios físicos com líquidos densos, análises químicas do elemento principal ou estudos sistemáticos em lupa binocular e em microscopia óptica (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

Nos ensaios físicos, a utilização de gradientes de densidade obtidos a partir de diferentes líquidos pesados constitui um dos procedimentos mais rápidos para avaliar o grau de liberação de minerais granulares presentes em um minério ou em produtos específicos. Quando o material é previamente classificado em distintas frações granulométricas e se encontra adequadamente liberado, cada partícula se posiciona, na coluna de gradiente, na região correspondente à sua densidade. Para esse fim, empregam-se líquidos imiscíveis com densidades variadas, resultando na formação de camadas horizontais bem delimitadas, o que permite a identificação da liberação das diferentes espécies mineralógicas por simples inspeção visual. Contudo, uma limitação desse método reside na impossibilidade de se obter gradientes com densidades superiores a 4,3, valor máximo alcançado pela solução de Clerici (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

De forma alternativa, o grau de liberação do mineral de interesse pode ser estimado a partir da quantificação do teor do principal elemento químico que o compõe, ou ainda de um elemento presente exclusivamente no mineral valioso, nos produtos de concentração obtidos por separações sequenciais em líquidos de diferentes densidades (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

A estimativa do grau de liberação de um minério por meio de lupa binocular e microscópio óptico constitui um método simples, porém de baixa precisão quando utilizado isoladamente, sendo, portanto, mais indicado para orientar ensaios de beneficiamento. Em laboratório, a avaliação da liberação é realizada em material granular, podendo envolver análises em lupa binocular ou, conforme a granulometria, em seções polidas de minerais opacos e/ou lâminas delgadas de minerais transparentes, observadas em microscópio óptico polarizante (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

O método proposto por Gaudin (1939) baseia-se na análise detalhada dos produtos em faixas granulométricas estreitas, podendo incluir etapas prévias de concentração por separações densitárias e/ou eletromagnéticas. Nesse procedimento, são contados, em média, 200 grãos minerais, aos quais se atribuem índices de liberação para partículas livres e mistas. O grau de liberação é calculado a partir da razão entre o índice das partículas livres e a soma dos índices das partículas livres e mistas, expressa em porcentagem. Para partículas totalmente livres de ganga, atribui-se índice máximo, enquanto as partículas mistas recebem valores estimados de forma comparativa (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

A determinação da liberação pode envolver técnicas de contagem por pontos ou por área, conforme a proporção dos minerais na amostra. Apesar de amplamente utilizado, o método de Gaudin é trabalhoso e sujeito a incertezas associadas à variabilidade dimensional das partículas e à subjetividade na avaliação das partículas mistas, sendo recomendada a repetição das contagens por diferentes analistas, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.

### **3.2 Liberação mineral: fundamentos e importância**

O grau de liberação é um dos parâmetros centrais no estudo do comportamento do minério em operações de beneficiamento mineral. Esse conceito refere-se à proporção de partículas de minerais valiosos completamente separadas das partículas de minerais de

ganga após as etapas de cominuição. Assim, uma partícula é considerada liberada quando toda a sua superfície é composta por um único mineral; por outro lado, partículas que contêm mais de uma fase (mineral de ganga e mineral valioso) são classificadas como partículas mistas. A definição clássica é apresentada por Gaudin (1939), que descreve a liberação como a condição em que o mineral útil se encontra totalmente separado dos minerais de ganga. Dessa forma, a determinação do grau de liberação está diretamente associada à relação entre o tamanho dos grãos minerais e o das partículas, sendo fundamental para avaliar se a fragmentação atingiu o nível adequado para as operações subsequentes de concentração (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

O tamanho ótimo de liberação corresponde ao intervalo granulométrico no qual se obtém a maior proporção de partículas totalmente liberadas, com a menor geração de finos. Além disso, a moagem excessiva, além de aumentar os custos operacionais, produz material ultrafino que prejudica a flotação e as separações densitárias. Por outro lado, uma moagem insuficiente mantém uma alta proporção de partículas mistas, reduzindo a eficiência dos processos de concentração.

Considerando esses aspectos, na separação densitária, a diferença de densidade entre o mineral útil e a ganga só se manifesta plenamente quando as partículas estão liberadas. Caso contrário, partículas mistas apresentam densidade intermediária, o que reduz a nitidez da separação e pode resultar na perda de mineral útil na fração leve ou na contaminação do concentrado (Chaves, 2010).

Diante disso, o ensaio em líquido denso constitui uma ferramenta relevante para estimar o grau de liberação. Nesse procedimento, ao submeter amostras a um fluido de densidade controlada, é possível separar as partículas em frações menos densas e mais densas de acordo com suas densidades reais. Entre as partículas liberadas, a densidade observada corresponde à do mineral predominante; enquanto, nas partículas mistas, o valor é intermediário. Assim, a distribuição das massas nas frações densitárias fornece um diagnóstico preliminar da liberação em cada faixa granulométrica (Hamilton; Barbosa; Bertolino, 2010).

### **3.3 Métodos de determinação do grau de liberação**

A determinação do grau de liberação é essencial para o planejamento e a otimização dos processos de beneficiamento mineral. Nesse contexto, os métodos

disponíveis dividem-se em diretos e indiretos.

De modo geral, os métodos diretos incluem análises por microscopia óptica, tradicionalmente utilizadas para examinar seções polidas e estimar a proporção de fases minerais (Gaudin, 1939). Apesar de amplamente difundida, essa técnica apresenta limitações, como baixa velocidade, dependência do operador e restrição às informações bidimensionais. Com os avanços tecnológicos, permitiu-se o desenvolvimento de técnicas automatizadas, como MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), MLA (Mineral Liberation Analyzer) e QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy), que utilizam processamento digital de imagens para caracterização mineral com maior precisão e velocidade, conforme demonstrado por Lin *et al.* (1987) no desenvolvimento inicial dessas ferramentas. Além disso, outra técnica direta é a microanálise por sonda eletrônica (microprobe), empregada quando os minerais não podem ser diferenciados por refletância óptica.

Por sua vez, os métodos indiretos inferem a liberação a partir do comportamento físico das partículas em processos de separação. Nesse grupo, destaca-se o fracionamento em líquidos densos, técnica clássica amplamente aplicada à avaliação indireta da liberação mineral em estudos laboratoriais e industriais (Hamilton; Barbosa; Bertolino, 2010). Entre suas limitações, incluem-se a influência da forma das partículas, a presença de fraturas e a formação de partículas mistas, além da restrição à densidade máxima atingível pelas soluções (Luz; Sampaio; Almeida, 2010).

### **3.4 Pegmatitos litiníferos e mineralogia do espodumênio**

Os pegmatitos litiníferos são rochas graníticas geologicamente evoluídas, pertencentes ao grupo dos pegmatitos do tipo LCT (Lithium-Cesium-Tantalum), formadas nos estágios finais de cristalização de magmas peraluminosos — isto é, magmas que apresentam excesso de alumínio em relação a sódio, potássio e cálcio — altamente fracionados. Nesse contexto, esses magmas residuais, enriquecidos em elementos incompatíveis, como Li, Cs, Ta, Nb, Rb e B, resultaram de processos de fracionamento magmático intensos que geraram líquidos pegmatíticos ricos em voláteis, favorecendo a cristalização de minerais de grande porte e a concentração de elementos raros. Do ponto de vista geológico, esses pegmatitos ocorrem associados a granitos férteis do tipo S e a zonas estruturais favoráveis, distribuindo-se principalmente em rochas metamórficas de médio grau, como xistos e metapelitos (Černý; Ercit, 2005). Como

consequência dessa evolução, a mineralogia típica desses corpos inclui espodumênio, petalita e lepidolita como principais minerais portadores de lítio, além de quartzo, feldspatos e micas. E podem apresentar zonamento interno bem definido ou pouco evidente (London, 2008).

O espodumênio é um silicato de lítio e alumínio ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) pertencente ao grupo dos piroxênios e com sistema cristalino monoclinico. Apresenta hábito prismático alongado, clivagem bem desenvolvida e dureza entre 6,5 e 7 na escala de Mohs, sendo o principal mineral portador de lítio em pegmatitos do tipo LCT (London, 2008).

A petalita é um aluminossilicato de lítio ( $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ ) também com sistema cristalino monoclinico. Caracteriza-se por coloração clara, brilho vítreo a nacarado e dureza entre 6 e 6,5, ocorrendo em pegmatitos litiníferos como fase primária ou em associação com o espodumênio, em função das condições de pressão e temperatura durante a formação (London, 2008).

Já a lepidolita é uma mica litinífera rica em potássio, alumínio e flúor  $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ , pertencente ao grupo das micas e com sistema cristalino monoclinico. Apresenta hábito lamelar, clivagem basal perfeita e coloração de lilás a rósea, características típicas de estágios avançados de fracionamento em pegmatitos LCT (London, 2008).

No que se refere aos minerais de ganga, o quartzo é um dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), que se cristaliza no sistema trigonal, com dureza 7, ausência de clivagem e fratura conchoidal. É um mineral essencial em pegmatitos graníticos, ocorrendo em todas as zonas e frequentemente formando cristais de grandes dimensões devido ao elevado teor de voláteis dos líquidos pegmatíticos (London, 2008).

Associada a esse mineral, a albita é um feldspato sódico ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) pertencente à série dos plagioclásios e cristaliza no sistema triclinico. Em pegmatitos litiníferos, ocorre associada a quartzo e feldspato potássico, podendo apresentar intercrescimentos gráficos e texturas características de cristalização tardia (London, 2008).

De forma complementar, os feldspatos potássicos, representados principalmente por microclina e ortoclásio, possuem composição  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  e cristalizam nos sistemas triclinico ou monoclinico. São minerais essenciais em pegmatitos graníticos, formando cristais de grande porte e intercrescimentos gráficos com quartzo (London, 2008).

Nesse mesmo contexto mineralógico, os plagioclásios constituem uma série sólida entre albita e anortita, cristalizando no sistema triclinico. Em pegmatitos, predominam termos sódicos, associados a quartzo, feldspatos potássicos e micas, o que reflete a evolução composicional dos líquidos pegmatíticos (London, 2008).

Quanto às micas, a muscovita é uma mica potássica-alumínica, de fórmula  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ , que cristaliza no sistema monoclinico. Possui clivagem basal perfeita, coloração clara e brilho nacarado, sendo comum em pegmatitos graníticos tanto como mineral primário quanto em zonas externas (London, 2008).

Por fim, a biotita é uma mica ferromagnésiana que cristaliza no sistema monoclinico. Apresenta coloração escura, hábito lamelar e clivagem basal perfeita, ocorrendo preferencialmente em zonas menos evoluídas de pegmatitos, associada a estágios iniciais de cristalização (London, 2008).

### **3.5 Contexto brasileiro**

No contexto brasileiro, o país ocupa posição de destaque no cenário mundial de lítio, figurando entre os países com as maiores reservas globais e como o quinto maior produtor mundial, segundo dados do United States Geological Survey (USGS, 2024). O Brasil possui reservas significativas de pegmatitos litiníferos, embora ainda inferiores às de países como o Chile, a Austrália e a Argentina. As reservas de lítio no país totalizam aproximadamente 642,5 mil toneladas de  $Li_2O$  contido em reservas provadas e prováveis (ANM, 2025).

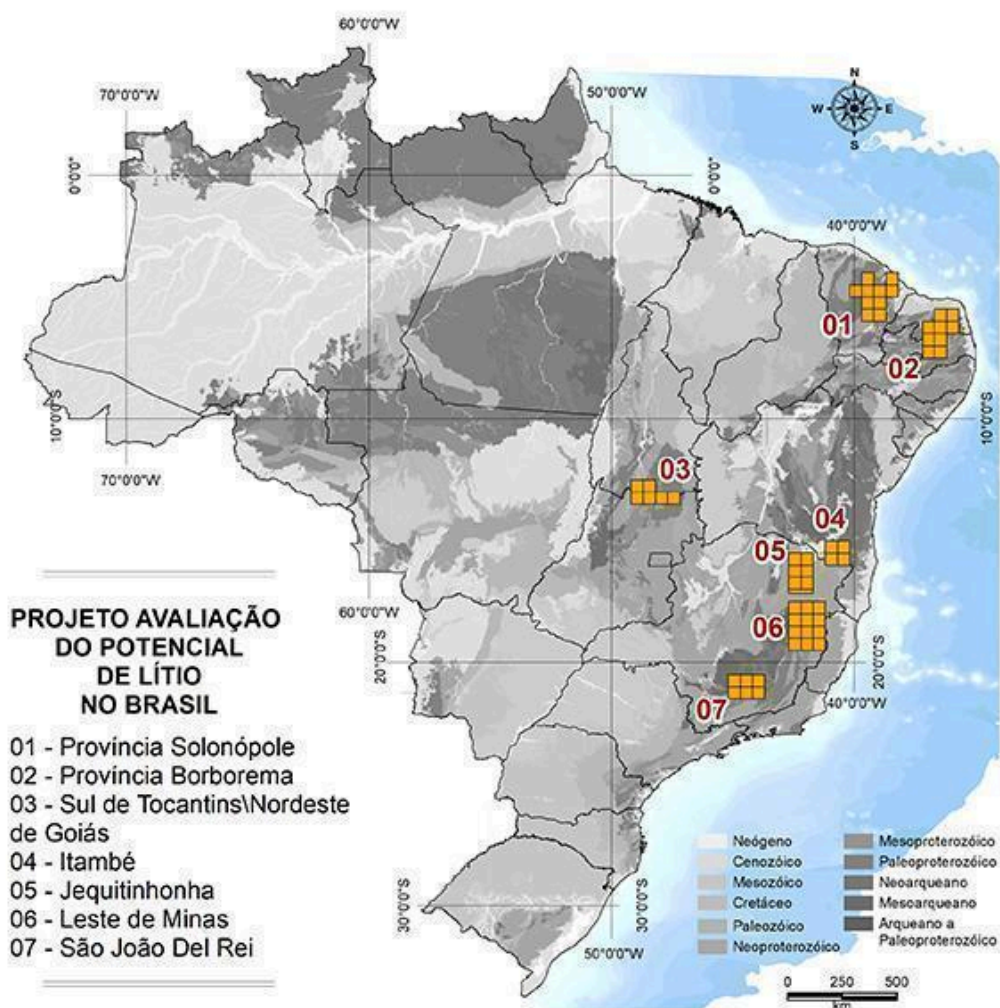
A distribuição geográfica das ocorrências de lítio no Brasil está associada a pegmatitos graníticos ricos em espodumênio, lepidolita, amblygonita e petalita, minerais que constituem as principais fontes de lítio economicamente exploradas no país. As províncias pegmatíticas brasileiras mais estudadas e com maior potencial mineral incluem a Província Nordeste (Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará), a Província Oriental (Minas Gerais e parte da Bahia) e a Província Meridional (São Paulo), reforçando a importância geológica dessas regiões para a geoeconomia do lítio no Brasil.

Adicionalmente, estudos e levantamentos promovidos pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM, 2023) também destacam o potencial brasileiro de lítio. Projetos de avaliação geológica vêm mapeando alvos promissores em pegmatitos no Nordeste, sobretudo na Província Pegmatítica da Borborema (Rio Grande do Norte e Paraíba), com

o objetivo de ampliar o conhecimento sobre novas ocorrências e contribuir para o aumento das reservas brasileiras.

A Figura 1 sintetiza a distribuição das principais áreas com potencial para lítio no Brasil, evidenciando sua associação a províncias pegmatíticas inseridas em terrenos cristalinos arqueanos e proterozóicos. Observa-se a concentração das ocorrências nas regiões Nordeste, Sudeste e parte do Centro-Oeste, com destaque para as províncias de Solonópole e Borborema, no Nordeste, e para áreas de Minas Gerais, como o Vale do Jequitinhonha, Leste de Minas e São João del-Rei, tradicionalmente vinculadas a pegmatitos do tipo LCT.

Figura 1 - Distribuição das principais áreas pegmatíticas no Brasil



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2023)

As principais reservas brasileiras estão localizadas em pegmatitos graníticos, com destaque para a Mina de Volta Grande, situada no município de Nazareno, Minas Gerais, a

243 km de Belo Horizonte. Esses depósitos, explorados há mais de um século, caracterizam-se pela presença de espodumênio como principal mineral portador de lítio, frequentemente associado a outros minerais de valor econômico, como tantalita, cassiterita e berilo, que são recuperados como subprodutos, o que contribui para as estratégias econômicas de exploração.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Amostra

A amostra de coproduto de uma planta de concentração gravítica de tantalita e cassiterita, proveniente de uma mineradora na região de Nazareno, Minas Gerais, foi cedida para análise no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Com um peso total de 17,46 kg, a amostra apresentava umidade, o que exigiu um período de secagem em condições ambientais de aproximadamente 24 horas. Após a secagem, a amostra foi desagregada e homogeneizada. Em seguida, foi quarteada pelo método de pilhas cônicas, considerado o mais adequado para o volume da amostra. Por fim, a amostra foi armazenada em porções menores para facilitar seu manuseio, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Amostra homogeneizada e quarteada



Fonte: Acervo pessoal do autor (2024)

Figura 3 - Amostra homogeneizada e quarteada



Fonte: Acervo pessoal do autor (2024)

#### 4.2 Determinação da densidade real de sólidos

A densidade real da amostra foi determinada por meio de picnometria a hélio, técnica baseada na medição do volume sólido a partir do deslocamento de gás, utilizando os princípios da Lei de Boyle ( $P_1V_1 = P_2V_2$ ). O hélio é empregado como fluido de medição por possuir moléculas de pequeno tamanho, capazes de penetrar em microporos acessíveis, além de apresentar comportamento próximo ao de um gás ideal e baixa interação com os materiais analisados, o que contribui para maior precisão nos resultados.

Para a realização do ensaio, a amostra foi previamente seca em estufa a aproximadamente 100 °C até atingir massa constante, garantindo a eliminação da umidade. Após o resfriamento, a massa foi determinada em balança. Em seguida, o material foi colocado na célula de análise do equipamento, cujo volume interno é conhecido e previamente calibrado, assegurando condições adequadas de vedação.

Durante a análise, o hélio é inicialmente introduzido em uma câmara sob pressão controlada e, posteriormente, expandido para a célula que contém a amostra. A partir da variação de pressão observada após o equilíbrio do sistema, o equipamento calcula automaticamente o volume real ocupado pelos grãos sólidos.

A densidade real foi então obtida pela relação entre a massa seca da amostra e o volume determinado pelo equipamento ( $\rho = m/V$ ).

### 4.3 Caracterização granulométrica da amostra global

Para a caracterização granulométrica, realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola de Minas da UFOP, foi executado, inicialmente, o peneiramento a úmido. Nesse processo, uma polpa com 40% de sólidos foi preparada e transferida para uma coluna de peneiras previamente selecionada. A distribuição granulométrica foi determinada utilizando 170 g de amostra, quantidade definida com base nos cálculos da massa mínima necessária para representar o lote inicial e da massa máxima permitida em cada peneira (Luz; Sampaio; Almeida, 2010). A série de peneiras empregada possuía aberturas variando de 2,36 mm a 0,037 mm (8 a 400 mesh, respectivamente).

O ensaio foi concluído quando a água coletada na saída estava tão limpa quanto a água nova adicionada, indicando que não havia mais partículas de minério na fração passante pela peneira de menor abertura (Sampaio; França; Braga, 2007). Em seguida, as frações retidas nas peneiras foram cuidadosamente removidas, secas em estufa a uma temperatura máxima de 100 °C e, posteriormente, pesadas para o cálculo da distribuição granulométrica.

Para assegurar a eficiência do peneiramento e, conseqüentemente, a precisão da análise granulométrica, foi calculada a massa máxima retida ( $M_i$ ) em cada peneira da série utilizada, conforme a Equação 2, de Gaudin:

$$M_i = A \times \rho \times n \times \frac{(d_i + d_s)}{2} \quad (2)$$

onde:

$M_i$  = massa que pode ficar retida em uma peneira de abertura  $i$ , cessado o peneiramento;

$A$  = área da peneira;

$\rho$  = densidade do material a ser ensaiado;

$d_i$  = abertura da peneira em análise;

$d_s$  = abertura da peneira imediatamente acima;

$n$  = número de camadas de partículas admitido (pode variar de 1 a 3).

#### **4.4 Determinação da área superficial e porosidade da amostra global - BET**

As análises de área superficial específica e porosidade foram conduzidas por meio do método de adsorção de nitrogênio no equipamento NOVA 1000 Quantachrome, no Laboratório de Propriedades Interfaciais do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Este equipamento baseia-se no princípio da adsorção de gás na superfície do sólido.

A adsorção de nitrogênio é fortemente influenciada pelas propriedades físicas do sólido, em particular pela sua estrutura de poros. Os ensaios realizados resultaram na obtenção dos seguintes parâmetros: área superficial específica, volume total de poros (porosidade), tamanho máximo dos poros, diâmetro médio dos poros, volume dos microporos (microporosidade) e área dos microporos.

#### **4.5 Separação em líquido denso**

A separação em líquido denso foi realizada com bromofórmio ( $\text{CHBr}_3$ ), de densidade  $2,89 \text{ g/cm}^3$ , em duplicata. Foram consideradas as seguintes frações: 20, 32, 48, 100 e 200 mesh (+850; -850/+500; -500/+297; -297/+149; -149/+74; e -74  $\mu\text{m}$ ).

Para cada ensaio de separação, foram utilizados 50 mL de bromofórmio, adicionados ao recipiente de separação, que consistia em um funil de vidro adaptado a uma mangueira siliconada, com fluxo controlado por um prendedor apropriado. A massa da amostra, de 20 g, era adicionada e homogeneizada com um bastão de vidro. Após a observação da separação das espécies minerais e a estabilização das duas fases (flutuado e afundado), o material afundado era retirado ao abrir o prendedor, conforme mostrado na Figura 4. O afundado era então filtrado por meio de um funil de vidro com papel de filtro, lavado com álcool etílico para remoção de resíduos de bromofórmio e, em seguida, seco à temperatura ambiente.

O flutuado, contendo partículas com densidade inferior a  $2,89 \text{ g/cm}^3$ , era retirado e submetido aos mesmos procedimentos aplicados ao material afundado. As massas de flutuado e de afundado obtidas em cada ensaio das frações granulométricas eram pesadas.

As amostras de flutuado e afundado foram enviadas para análises químicas e mineralógicas.

Figura 4 - Ensaio de separação em líquido denso (bromofórmio)



Fonte: Acervo pessoal do autor (2024)

Um parâmetro essencial na separação em meio denso é o critério de concentração, descrito na Equação 3. Baseado em princípios físicos, esse critério mede a capacidade de um fluido viscoso de separar partículas com densidades específicas distintas. Quanto maior o valor do critério de concentração, mais eficiente será a separação entre partículas mais densas e menos densas. A Equação 3 indica que o aumento da densidade específica do fluido eleva o critério de concentração, melhorando a eficiência do processo de separação.

$$CC = \frac{\rho_p - 1}{\rho_l - 1} \quad (3)$$

onde:

$\rho_p$  e  $\rho_l$  são as densidades dos minerais mais densos e menos densos, respectivamente, considerando a densidade da água igual a 1,0 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.6 Análise química pelo método ICP

A análise química por ICP (*Inductively Coupled Plasma*) seguiu uma série de etapas para assegurar a precisão dos resultados. A amostra de coproduto de minério de lítio foi inicialmente pulverizada e, em seguida, submetida a um processo de dissolução com ácidos adequados, transformando os elementos de interesse em solução líquida. Após a dissolução, a solução foi filtrada para remover resíduos sólidos que pudessem interferir na análise e, posteriormente, diluída com solvente adequado, ajustando as concentrações dos elementos a níveis apropriados para a detecção pelo ICP.

A amostra líquida preparada foi introduzida no equipamento por meio de um nebulizador, que a transformou em um aerossol fino. Esse aerossol foi direcionado à tocha de plasma, onde os elementos presentes foram ionizados em um ambiente de altas temperaturas, atingindo até 10.000 K.

Ainda assim, os dados obtidos da amostra foram posteriormente comparados aos padrões de referência, permitindo determinar com precisão as concentrações dos elementos presentes. Os resultados foram processados e apresentados em gráficos e/ou tabelas, evidenciando as concentrações de cada elemento analisado.

#### 4.7 Caracterização mineralógica - Difractometria de raios X

A abordagem do ensaio laboratorial de difração de raios X (DRX) começou pela preparação da amostra, na qual o minério foi pulverizado até obter um pó fino e homogêneo, evitando contaminação. Essa homogeneidade é crucial, pois afeta diretamente a precisão dos resultados. Em seguida, o pó foi compactado em um porta-amostras, formando um disco denso que assegura a qualidade da difração, essencial para uma análise uniforme.

Após a compactação, o porta-amostras foi montado no difratômetro, equipamento que gera raios X que incidem sobre a amostra. Os raios X, radiações eletromagnéticas com

comprimentos de onda entre  $10^3$  e  $10^5$  Å, foram difratados pelos planos cristalinos do material, resultando em um padrão registrado pelo equipamento. Essa difração foi guiada pela equação de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ), que deve ser atendida para que o padrão de difração específico de cada substância seja obtido. (Luz *et al.*, 2010)

A coleta de dados resultou na formação de padrões que foram analisados e comparados com bancos de dados de difração, permitindo a identificação das fases mineralógicas presentes no minério. A interpretação dos dados envolveu a utilização da intensidade dos picos de difração para quantificar as diferentes fases e avaliar suas características cristalinas.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 Determinação da densidade da amostra global**

O ensaio realizado, utilizando o método do picnômetro a hélio descrito anteriormente, resultou em densidade de 2,78 g/cm<sup>3</sup>. Assim, a densidade dos coprodutos de minério de lítio pode ser considerada de 2,78 g/cm<sup>3</sup>.

### **5.2 Caracterização granulométrica**

A distribuição granulométrica da amostra de coproduto de minério de lítio, obtida por meio de peneiramento úmido, foi detalhada na Tabela 1 e representada graficamente na Figura 4. A análise dos resultados mostrou que 55,54% das partículas da amostra apresentavam dimensões inferiores a 0,42 mm (35 mesh). Graficamente, foi determinado que o diâmetro mediano (d50) da amostra correspondia a 0,35 mm, enquanto o diâmetro referente a 80% das partículas (d80) era de 0,85 mm, indicando que a maior parte da amostra (80%) estava abaixo de 0,85 mm em termos de granulometria.

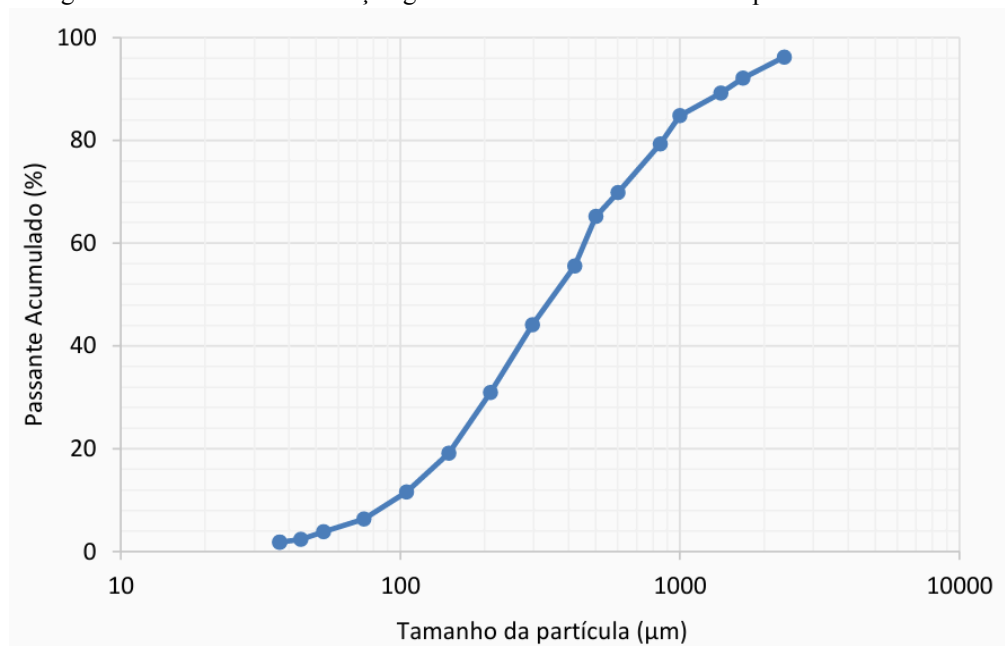
A validação do processo de peneiramento foi realizada com base na determinação da massa máxima retida em cada peneira, conforme apresentado na Tabela 1. Os cálculos demonstraram que a quantidade de material retido em cada peneira foi inferior ao limite máximo estabelecido pela Equação 2, de Gaudin, assegurando a precisão e a confiabilidade do método de peneiramento utilizado. Esses resultados foram fundamentais, pois confirmaram a adequação do procedimento para a análise granulométrica da amostra de coproduto de minério de lítio, garantindo a representatividade dos dados obtidos e permitindo a aplicação dessas informações em etapas subsequentes de caracterização e processamento mineral.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica da amostra do coproduto de minério de lítio

Abertura da peneira		Massa retida (g)	% Retida em cada peneira	Mi			% Retida acumulada	% Passante na peneira
mesh	mm			n=1 (g)	n=2 (g)	n=3 (g)		
8	2,36	6,24	3,78	-	-	-	3,78	96,22
10	1,68	6,79	4,12	157,38	314,77	472,15	7,90	92,10
14	1,40	4,81	2,92	119,99	239,97	359,96	10,81	89,19
18	1,00	7,20	4,36	93,50	186,99	280,49	15,18	84,82
20	0,850	9,11	5,52	71,52	143,05	214,57	20,70	79,30
28	0,600	15,65	9,49	55,94	111,88	167,82	30,19	69,81
32	0,500	7,58	4,60	42,85	85,70	128,56	34,78	65,22
35	0,420	15,96	9,68	35,84	71,68	107,52	44,46	55,54
48	0,297	18,91	11,46	27,93	55,86	83,80	55,92	44,08
65	0,210	21,69	13,15	19,75	39,50	59,25	69,07	30,93
100	0,149	19,48	11,81	13,99	27,97	41,96	80,88	19,12
150	0,105	12,49	7,57	9,89	19,79	29,68	88,45	11,55
200	0,074	8,68	5,26	6,97	13,95	20,92	93,71	6,29
270	0,053	4,10	2,49	4,95	9,89	14,84	96,20	3,80
325	0,044	2,40	1,45	3,78	7,56	11,34	97,65	2,35
400	0,037	0,90	0,55	3,16	6,31	9,47	98,20	1,80
-400	-0,037	2,97	1,80	-	-	-	100,00	0,00
Total	-	164,96	100,00	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 5 - Gráfico de distribuição granulométrica da amostra do coproduto de minério de lítio



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 5.3 Determinação da área superficial e porosidade da amostra global - BET

A Tabela 2 apresenta os principais resultados relacionados a área superficial e porosidade obtidos pela técnica BET.

Tabela 2 - Principais parâmetros definidos pela técnica BET para a amostra de coproduto de minério de lítio

Amostra	Superfície Específica (m <sup>2</sup> /g)	Volume total dos poros (cm <sup>3</sup> /g)	Tamanho máximo dos poros (Å)	Diâmetro Médio de Poros (Å)	Volume dos microporos (cm <sup>3</sup> /g)	Área dos Microporos (m <sup>2</sup> /g)
Global	0,502	1,74x10 <sup>-4</sup>	26,06	13,868	3,74x10 <sup>-4</sup>	0,3412

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A determinação da superfície específica é fundamental para a utilização de minérios de lítio na produção de baterias de íons de lítio, sendo necessário que essa área superficial atenda às especificações exigidas. Conforme apresentado na Tabela 2, a amostra de coproduto de minério de lítio apresentou uma área superficial de 0,502 m<sup>2</sup>/g. Assim, é imprescindível ter acesso a dados sobre a superfície específica e a porosidade desse minério, especialmente quando ele é empregado como matéria-prima ou em outras aplicações nas quais esses parâmetros são significativos.

#### 5.4 Separação em líquido denso

A Tabela 3 apresenta a distribuição dos produtos flutuado e afundado obtidos na separação em meio denso com bromofórmio, aplicada às faixas granulométricas de 0,850, 0,500, 0,297, 0,149, 0,074 e -0,074 mm. Os resultados mostram que 76,66% do material possui densidade inferior a 2,89 g/cm<sup>3</sup>, compondo o produto flutuado, enquanto os 23,34% restantes correspondem ao produto afundado, com densidade superior a esse valor. Essa proporção evidencia a eficiência do método na distinção entre frações menos densas e mais densas, permitindo caracterizar adequadamente os diferentes constituintes da amostra e fornecendo informações essenciais para a avaliação subsequente do grau de liberação do espodumênio.

Tabela 3 - Distribuição dos produtos flutuado e afundado, resultantes da separação em meio denso (bromofórmio,  $d = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ), de acordo com a faixa granulométrica

Faixa Granulométrica		Alimentação		Afundado		Flutuado	
Abertura (mesh)	mm	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
-200	-0,074	19,85	16,10	4,58	3,71	15,27	12,39
200	0,074	20,59	16,70	3,30	2,68	17,28	14,02
100	0,149	19,79	16,05	3,18	2,58	16,61	13,47
48	0,297	19,99	16,22	4,62	3,75	15,37	12,47
32	0,500	19,61	15,91	5,38	4,37	14,23	11,54
20	0,850	23,44	19,02	7,71	6,25	15,74	12,77
Total		123,27	100,00	-	23,34	-	76,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de separação em meio denso, por faixa granulométrica

<b>Faixa Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Produtos Densimétricos</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Teor <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>	<b>Distribuição <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>
+850	< 2,89	67,13	0,12	5,1
	> 2,89	32,87	4,56	94,84
	Total	100	1,58	100
<b>Faixa Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Produtos Densimétricos</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Teor <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>	<b>Distribuição <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>
-850/+500	< 2,89	72,55	0,18	9,53
	> 2,89	27,45	4,52	90,52
	Total	100	1,37	100
<b>Faixa Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Produtos Densimétricos</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Teor <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>	<b>Distribuição <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>
-500/+297	< 2,89	76,89	0,07	5,13
	> 2,89	23,11	4,40	96,77
	Total	100	1,05	100
<b>Faixa Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Produtos Densimétricos</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Teor <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>	<b>Distribuição <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>
-297/+149	< 2,89	83,93	0,14	17,03
	> 2,89	16,07	3,56	82,97
	Total	100	0,69	100
<b>Faixa Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Produtos Densimétricos</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Teor <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>	<b>Distribuição <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>
-149/+74	< 2,89	83,95	0,30	37,04
	> 2,89	16,05	2,67	63,06
	Total	100	0,68	100
<b>Faixa Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Produtos Densimétricos</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Teor <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>	<b>Distribuição <math>\text{Li}_2\text{O}</math> (%)</b>
-74	< 2,89	76,94	0,22	16,12
	> 2,89	23,06	2,60	57,19
	Total	100	1,05	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Conforme apresentado na Tabela 4, nas frações mais grossas, como +850  $\mu\text{m}$ , o produto afundado apresentou teor de  $\text{Li}_2\text{O}$  de 4,56%, responsável por 94,84% da distribuição do lítio. Considerando que o espodumênio puro possui teor teórico de aproximadamente 8,03% de  $\text{Li}_2\text{O}$  (USGS, 2024) esse valor corresponde a cerca de 57% do teor máximo esperado para o mineral ideal, indicando que a fração afundada é composta predominantemente por espodumênio, ainda que contenha certa proporção de minerais de ganga. Esse comportamento também foi observado nas faixas -850/+500  $\mu\text{m}$  e -500/+297  $\mu\text{m}$ , cujos produtos afundados apresentaram teores de 4,52% e 4,40% de  $\text{Li}_2\text{O}$ , respectivamente, com distribuições superiores a 90%.

Considerando o teor teórico da densidade do espodumênio ( $\approx 3,1\text{--}3,2 \text{ g/cm}^3$ ) em relação aos principais minerais de ganga presentes no pegmatito, como quartzo e feldspatos ( $\approx 2,6\text{--}2,7 \text{ g/cm}^3$ ), os resultados evidenciam que, até aproximadamente  $300 \mu\text{m}$ , o mineral de interesse permanece majoritariamente concentrado na fração mais densa.

A partir da fração  $-297/+149 \mu\text{m}$ , observou-se redução no teor de  $\text{Li}_2\text{O}$  do produto denso (3,56%) e queda na distribuição (83%). Esse comportamento sugere a presença de partículas parcialmente liberadas ou mistas, o que reduz a eficiência da separação por densidade. Nas frações mais finas,  $-149/+74 \mu\text{m}$  e  $-74 \mu\text{m}$ , os teores de  $\text{Li}_2\text{O}$  dos produtos afundados diminuem para 2,67% e 2,60%, com distribuições de 63% e 57%, respectivamente. Esses resultados refletem a presença de partículas ultrafinas e mistas o que prejudica a seletividade do processo.

De forma geral, os dados indicam que o espodumênio apresenta maior liberação em granulometrias mais grossas, comportamento típico de minerais de pegmatitos, nos quais o espodumênio ocorre em cristais grandes e bem desenvolvidos. Em contrapartida, granulometrias inferiores a  $149 \mu\text{m}$  apresentam perda de seletividade e dificultam a concentração do mineral, pois a liberação torna-se insuficiente e a separação densitária perde eficiência devido ao aumento de partículas mistas e finas.

Assim, os resultados demonstram que o grau ideal de liberação do espodumênio na amostra estudada ocorre predominantemente em tamanhos superiores a  $297 \mu\text{m}$ , enquanto as frações granulométricas mais finas apresentam menor seletividade e podem contribuir para perdas metalúrgicas.

Após a realização dos ensaios de separação por líquido denso, com o objetivo de avaliar a eficácia das técnicas de separação por gravidade, a Tabela 5 apresenta a densidade específica média de cada mineral e o critério de concentração (CC), calculado com base na Equação 3, em que o espodumênio é o mineral mais denso. A análise foi feita considerando um líquido denso, o bromofórmio, com densidade específica de  $2,50 \text{ g/cm}^3$ . Considera-se que um critério de concentração superior a 2,5 indica uma separação mais eficaz, garantindo, assim, a eficiência do processo (GIBSON *et al.*, 2021).

Tabela 5 - Densidade específica e critério de concentração (CC) em bromofórmio

Nome do Mineral	Fórmula do Mineral	Densidade Específica (D.E.)	D.E. Média (g/cm <sup>3</sup> )	CC em Líquido Denso (D.E. = 2.50 g/cm <sup>3</sup> )
Esodumênio	LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3,1 – 3,2	3,15	1,00
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	2,65 – 2,66	2,65	4,33
Microclina (feldspato K)	K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2,54 – 2,57	2,56	10,83
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	2,77 – 2,88	2,83	1,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

### 5.5 Análise química pelo método ICP

Os resultados da análise química dos elementos e compostos do produto afundado, obtidos nos ensaios de separação em líquido denso, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da análise química dos demais elementos e/ou compostos do produto afundado obtido na separação em líquido denso, por faixa granulométrica

Faixa Granulométrica (µm)	Elementos Analisados (%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	MnO	F
+850	57,51	24,68	2,86	<L.D.	3,62	2,37	1,51	0,44	0,3
-850/+500	58,26	24,11	3,66	1,34	2,33	2,44	1,32	0,43	0,26
-500/+297	54,49	15,52	3,7	1,49	3,15	2,64	1,26	0,55	0,21
-297/+149	53,98	19,02	3,07	3,44	3,3	3,24	1,39	0,61	0,25
-149/+74	56,92	12,68	9,87	1,89	<L.D.	6,86	3,03	0,36	0,16
-74	9,58	6,16	20,48	1,89	1,76	9,07	<L.D.	2,82	<L.D.

\*&lt;L.D.=Menor que o limite de detecção.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

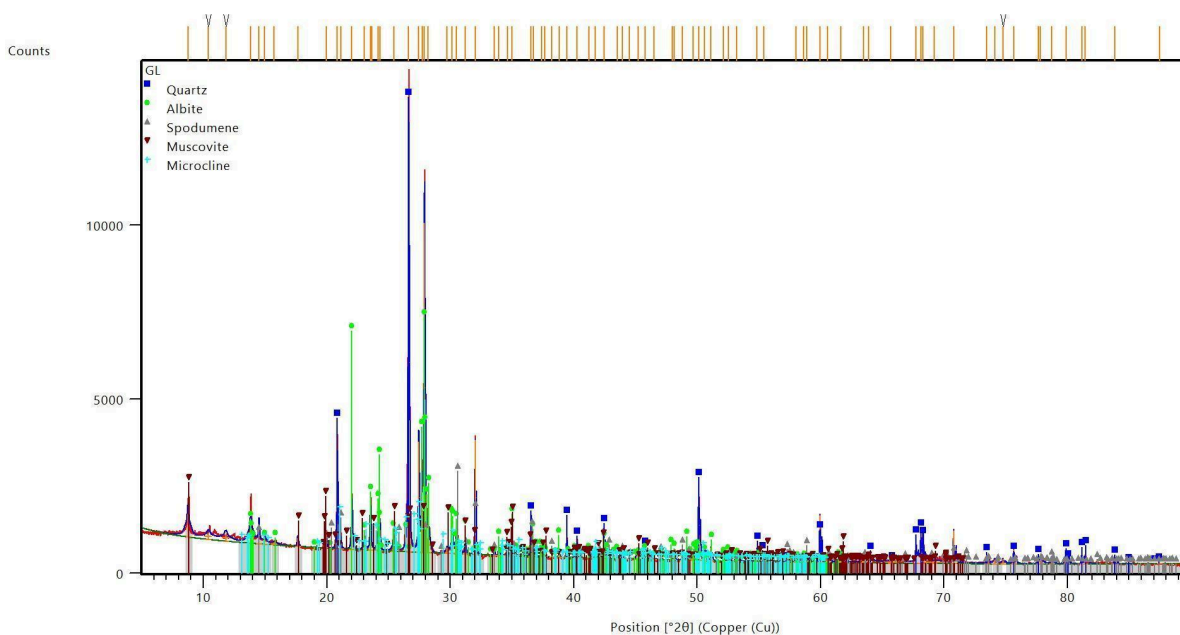
Conforme apresentado na Tabela 6, observa-se que, no produto afundado das frações granulométricas entre +850 e -850/+500 µm, os óxidos SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são os componentes majoritários, o que indica a presença significativa de minerais como feldspatos e quartzo, associados a minerais de maior densidade. Em contrapartida, na fração mais fina analisada (-74 µm), o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é o principal constituinte, indicando a ocorrência expressiva de minerais portadores de ferro.

## 5.6 Caracterização mineralógica - Difratometria de raios X

Conforme os resultados de difratometria de raios X (DRX) apresentados na Figura 6, os principais minerais de ganga a serem separados do espodumênio ( $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ ) são quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), muscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) e microclina ( $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ).

Na Figura 6, a intensidade dos picos de difração revela que o quartzo constitui o mineral predominante na amostra, indicando que os coprodutos provenientes da mineradora na região de Nazareno ainda apresentam teor expressivo de sílica livre. A identificação de albita e microclina confirma a presença de feldspatos, minerais característicos de pegmatitos e granitos. Os picos de difração do espodumênio, por sua vez, apresentam intensidade relativamente baixa, o que corrobora sua reduzida concentração no material rejeitado. Ademais, a detecção de muscovita evidencia a presença de filossilicatos, cuja morfologia lamelar pode prejudicar a eficiência da separação em meio denso, por interferir na sedimentação diferencial das partículas.

Figura 6 - Análise mineralógica por DRX da amostra global

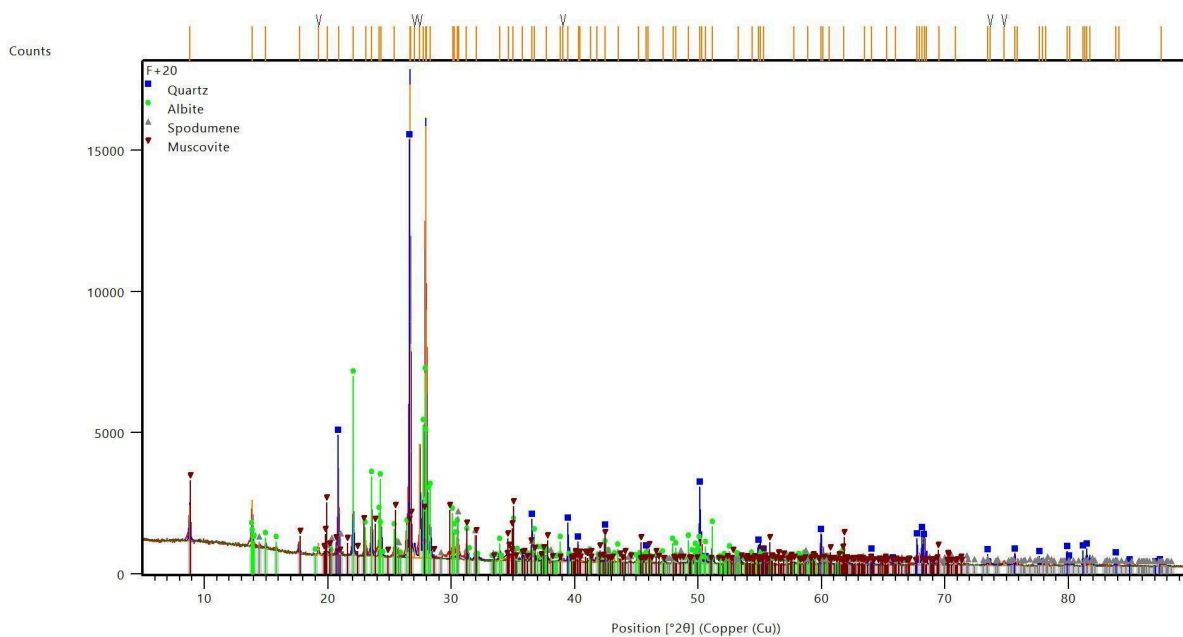


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise comparativa dos difratogramas do material flutuado e do material afundado da fração +20# (Figuras 7 e 8) evidencia diferenças mineralógicas coerentes com o comportamento densimétrico esperado. No flutuado, observam-se picos intensos de quartzo, albita e muscovita, o que confirma o predomínio de minerais leves, característicos da ganga feldspática e filossilicática. Já o afundado apresenta intensificação dos picos de espodumênio,

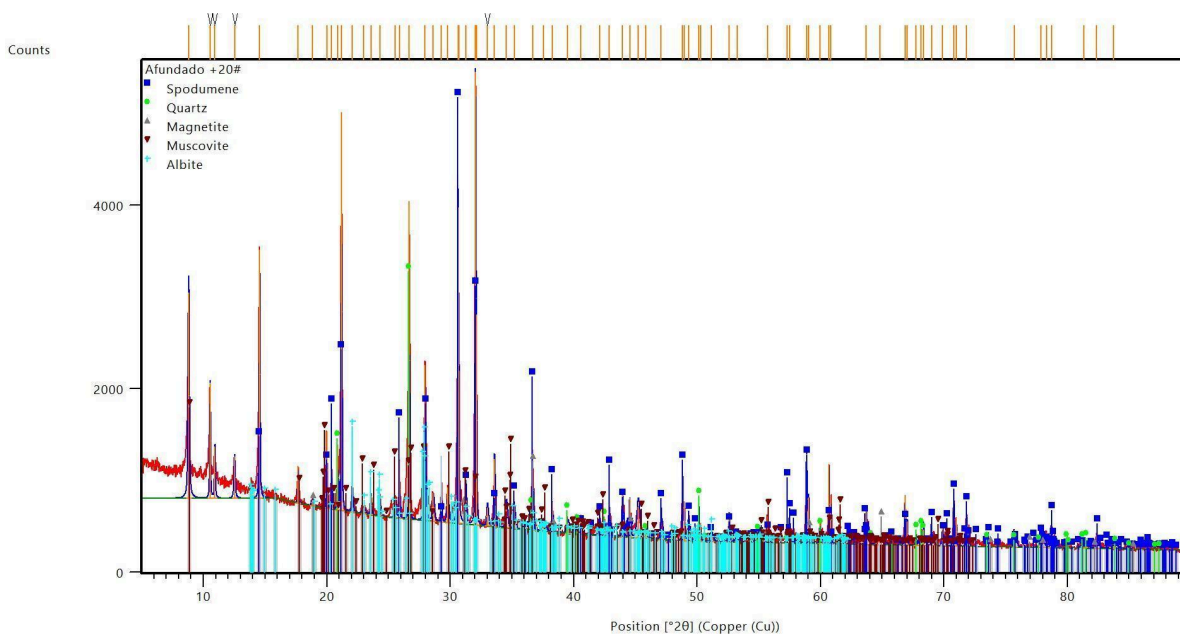
indicando maior concentração do mineral portador de lítio na fração densa, além da identificação de magnetita, ausente na fração leve. Apesar de quartzo e feldspatos ainda estarem presentes, suas intensidades relativas são menores do que o flutuado, refletindo uma separação mineralógica eficaz.

Figura 7 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +20#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

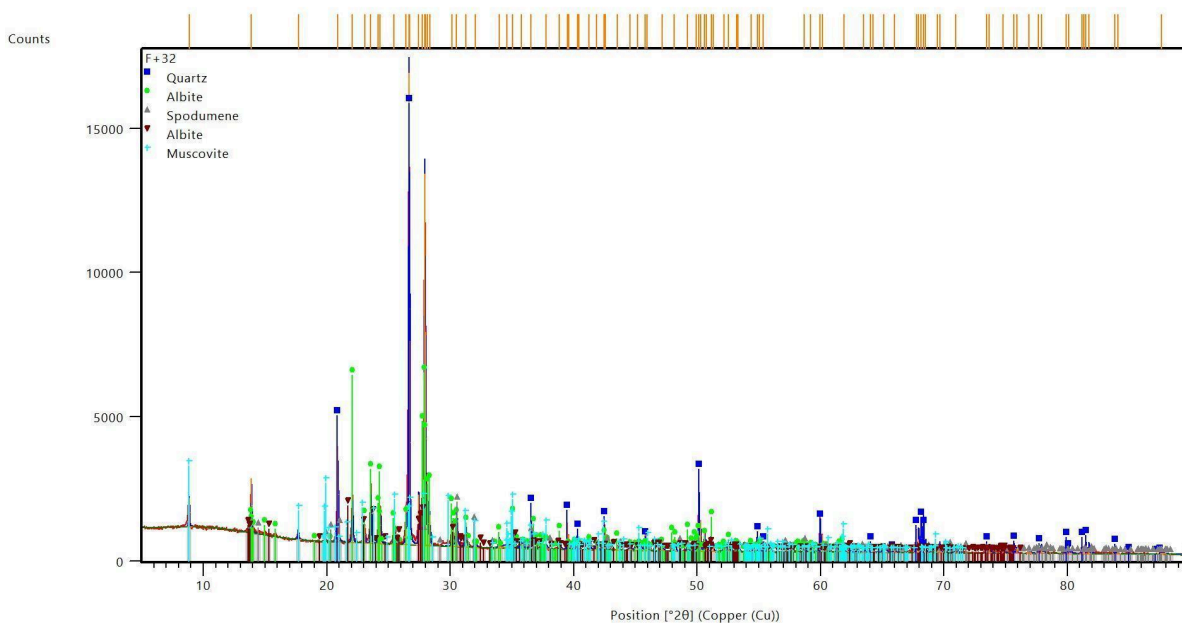
Figura 8 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +20#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

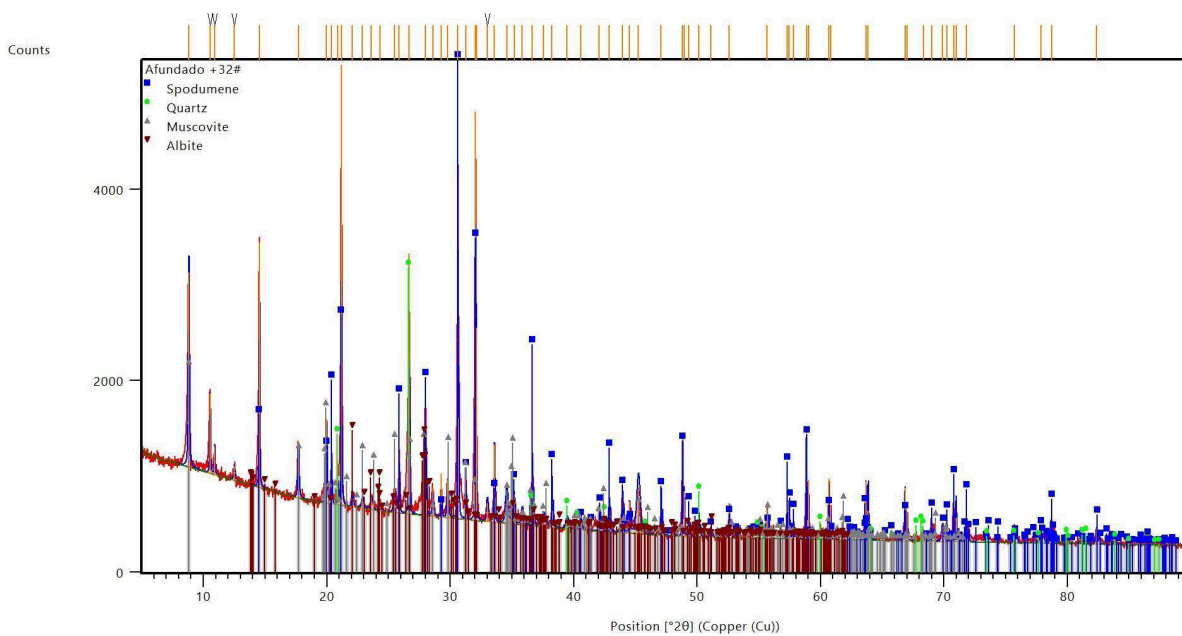
Na fração +32# (Figuras 9 e 10), observa-se comportamento semelhante ao da fração anterior. O flutuado apresenta picos mais intensos associados a quartzo, albita e muscovita, enquanto o afundado exibe aumento expressivo na intensidade dos picos de espodumênio, evidenciando sua concentração preferencial na fração mais densa. Embora minerais de ganga ainda sejam observados no afundado, suas intensidades relativas são inferiores às do flutuado, reforçando a eficiência da separação em meio denso nessa granulometria.

Figura 9 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +32#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

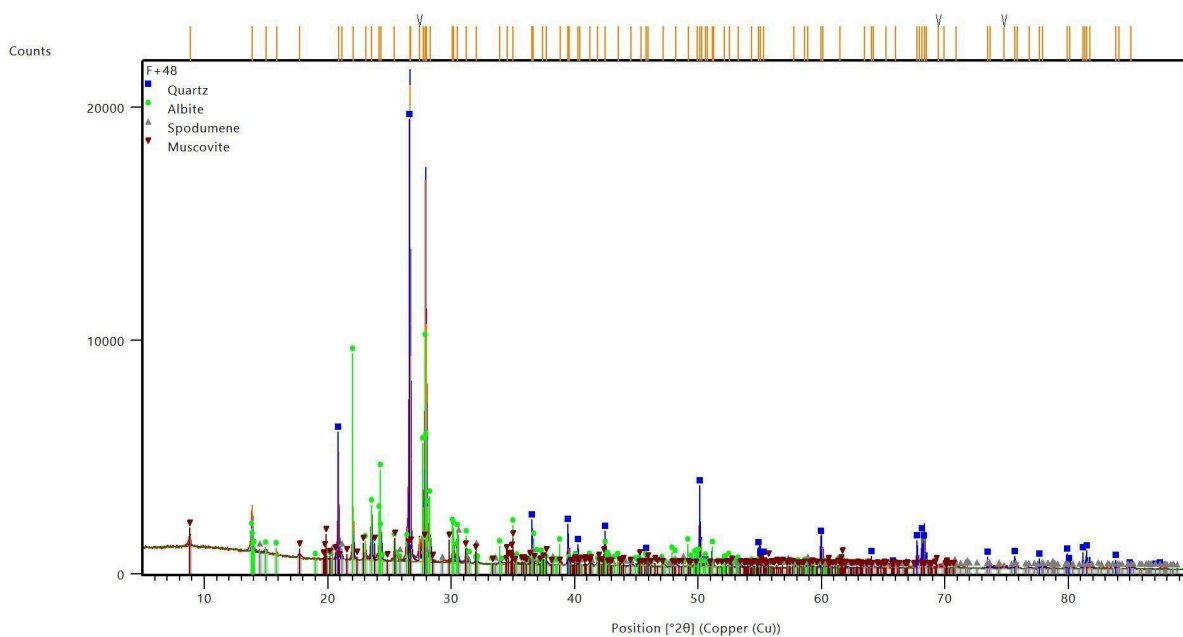
Figura 10 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +32#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

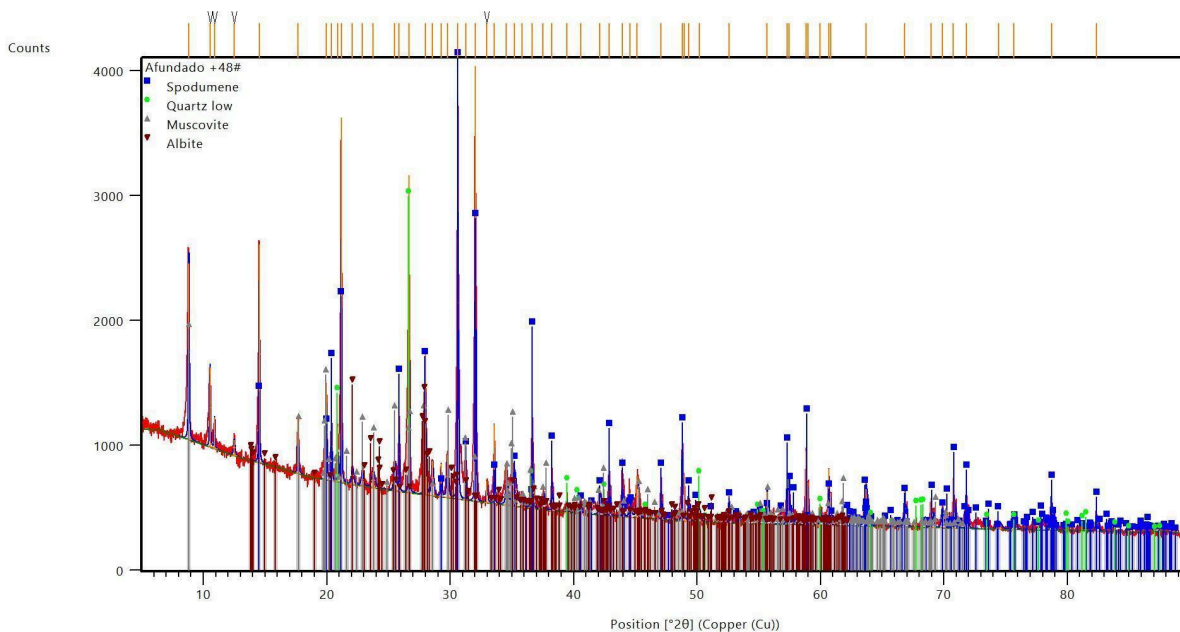
A fração +48# (Figuras 11 e 12) mantém a tendência: o material flutuado é composto majoritariamente por quartzo, albita e muscovita, indicando predomínio de minerais leves. No afundado, observa-se intensificação dos picos de espodumênio, enquanto os minerais de ganga apresentam menor intensidade relativa, confirmando a continuidade do enriquecimento do espodumênio na fração mais densa.

Figura 11 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +48#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

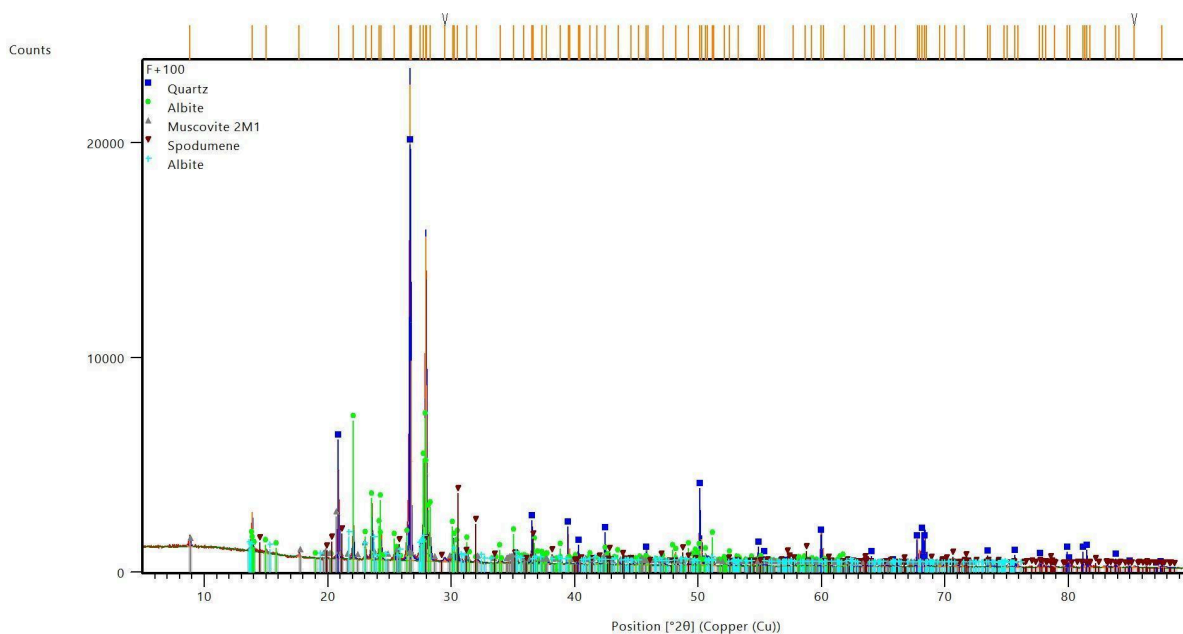
Figura 12 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +48#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

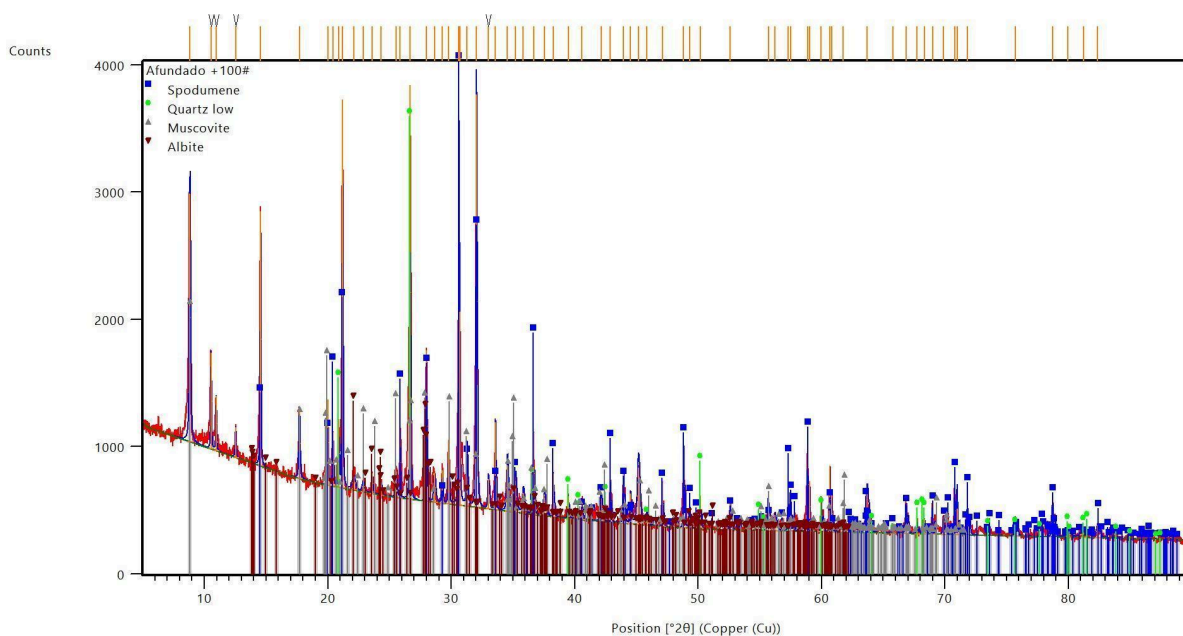
Na fração +100# (Figuras 13 e 14), o flutuado apresenta forte predominância de quartzo, albite e muscovita. O afundado, por sua vez, exibe maior definição e intensidade dos picos de espodumênio, o que demonstra que a separação em meio denso permanece eficiente mesmo com partículas mais finas.

Figura 13 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +100#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

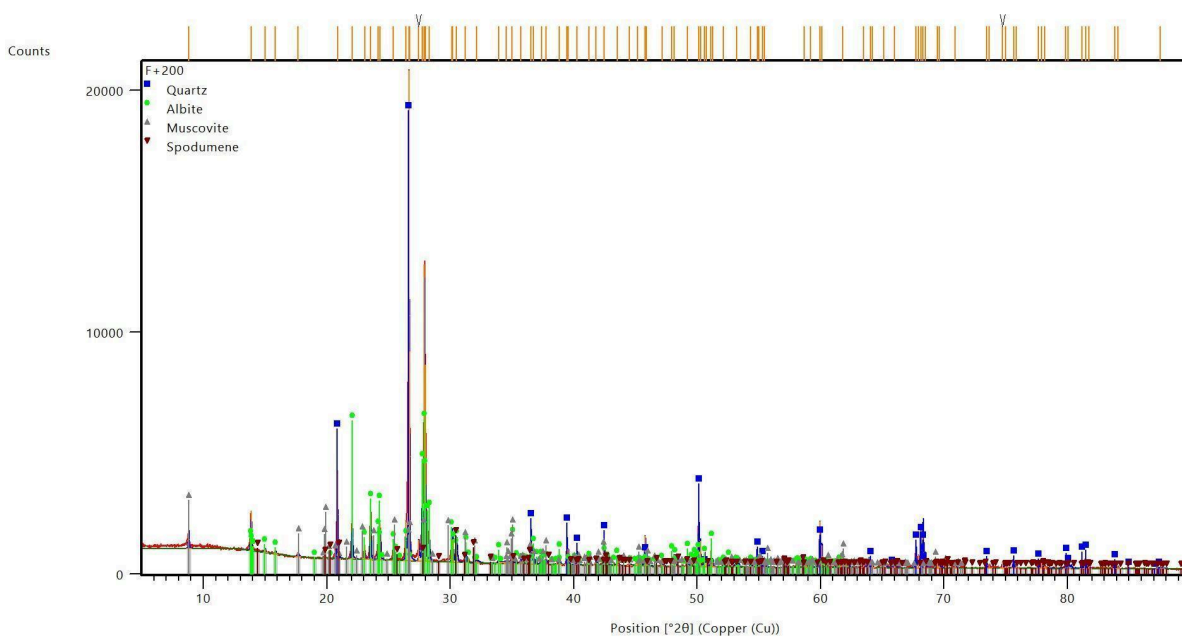
Figura 14 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +100#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

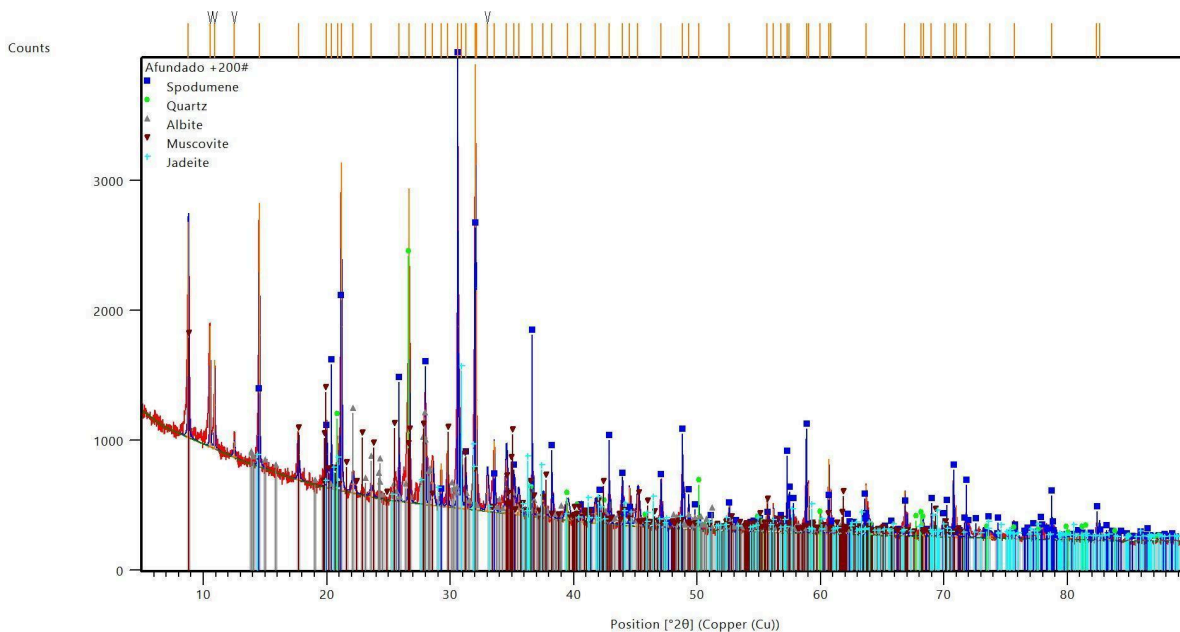
Na fração +200# (Figuras 15 e 16), o flutuado mantém predomínio de quartzo, albite e muscovita. No afundado, observa-se intensificação dos picos de espodumênio e a presença adicional de jadeíta. Apesar de ainda conter minerais de ganga, a intensidade dos picos é menor em comparação ao flutuado, reforçando novamente o sucesso da separação por densidade.

Figura 15 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado +200#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

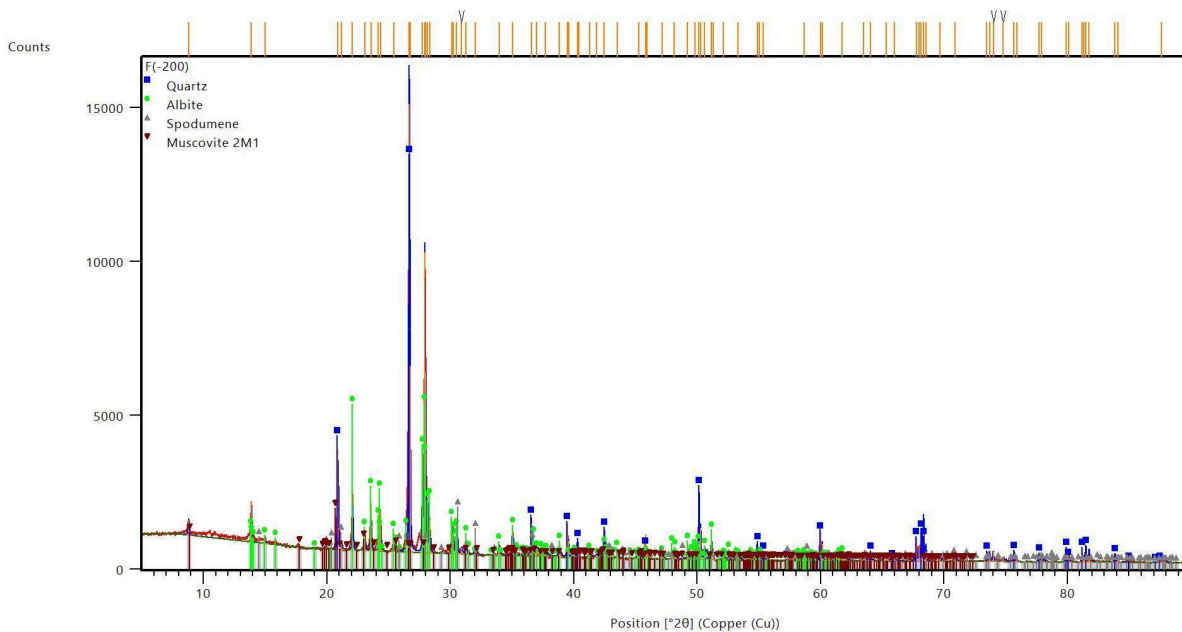
Figura 16 - Análise mineralógica por DRX do material afundado +200#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

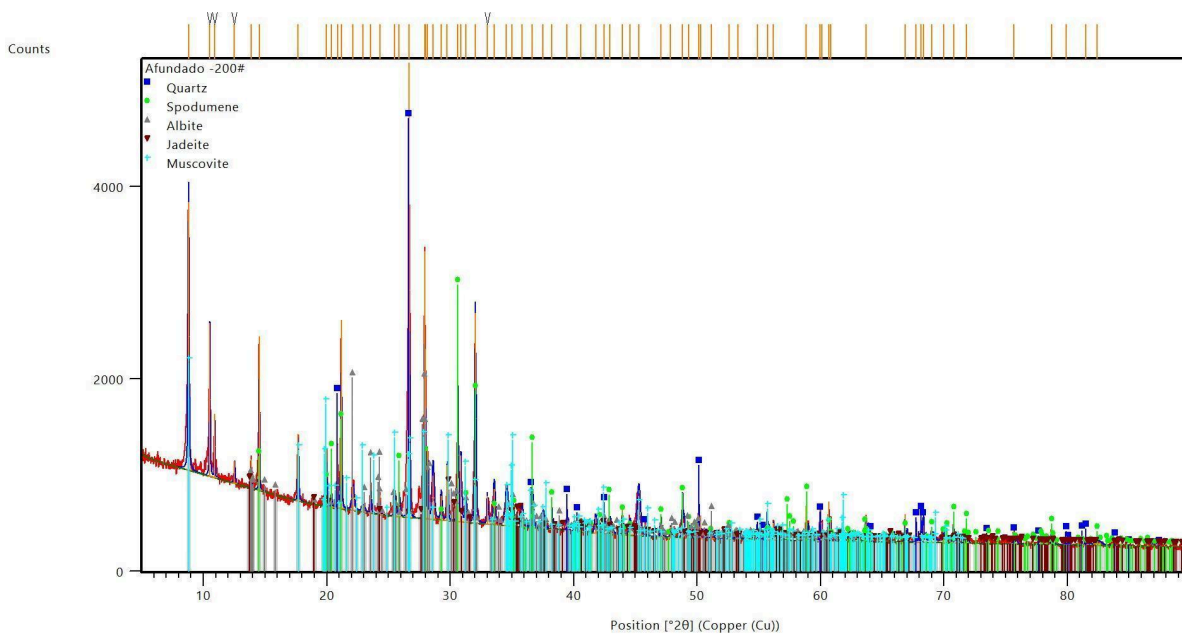
Por fim, na fração  $-200\#$  (Figuras 17 e 18), o fluviado apresenta picos intensos de quartzo, albite e muscovita, enquanto o material afundado mostra intensificação marcante dos picos de espodumênio e a presença de jadeíta, indicando concentração preferencial do mineral de interesse mesmo em granulometrias muito finas. A redução da intensidade dos minerais de ganga no afundado demonstra que, também nesta fração, a separação em meio denso foi eficaz para o enriquecimento do espodumênio.

Figura 17 - Análise mineralógica por DRX do material flutuado -200#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 18 - Análise mineralógica por DRX do material afundado -200#



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como finalidade determinar o grau de liberação do espodumênio em uma amostra de pegmatito litinífero por meio de ensaios de separação em líquido denso, associados à caracterização mineralógica, química e granulométrica. Os resultados obtidos demonstraram que a amostra é composta predominantemente por minerais de ganga, tais como quartzo, albita, microclina e muscovita, enquanto o espodumênio ocorre em menor proporção, comportamento esperado por se tratar de um material proveniente do coproduto.

Os ensaios de separação densitária mostraram que, nas frações granulométricas mais grossas (+297  $\mu\text{m}$ ), o espodumênio concentra-se principalmente no produto afundado, com teores e distribuições de  $\text{Li}_2\text{O}$  superiores a 4% e 90%, respectivamente. Esses valores indicam um elevado grau de liberação nessas granulometrias. Em contrapartida, nas faixas intermediárias e finas (-297  $\mu\text{m}$ ), observou-se redução gradual da distribuição, atribuída ao aumento da proporção de partículas mistas e ultrafinas, o que compromete a eficiência da separação densitária.

As análises por DRX confirmaram o enriquecimento de espodumênio nas frações mais densas (afundadas) e a concentração de minerais leves no flutuado, comportamento consistente em todas as granulometrias avaliadas. A presença de minerais acessórios, como magnetita e jadeíta, em algumas frações reflete a complexidade mineralógica típica de pegmatitos litiníferos.

De maneira geral, conclui-se que o grau ideal de liberação do espodumênio ocorre predominantemente em granulometrias superiores 297  $\mu\text{m}$ , sendo estas as faixas mais adequadas para etapas de pré-concentração baseadas em diferenças de densidade. Em granulometrias finas, a eficiência do processo pode diminuir significativamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMSTUTZ, G. C. Density and specific gravity in mineral processing. Berlin: Springer, 1975.
- ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Sistema SIGMINE – Dados de processos minerários. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- ČERNÝ, P.; ERCIT, T. S. The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, v. 40, 2005.
- CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- CHAVES, A. P. Tratamento de minérios: operações de cominuição e classificação. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2021.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Província Pegmatítica do Nordeste: síntese geológica e potencial mineral. Brasília: CPRM, 2020.
- GAUDIN, A. M. Principles of mineral dressing. New York: McGraw-Hill, 1939.
- GIBSON, C. et al. Mineralogical and textural controls on spodumene liberation and implications for lithium ore processing. *Minerals Engineering*, v. 171, 2021.
- HAMILTON, V. L.; BARBOSA, V. M.; BERTOLINO, L. C. Aplicação de líquidos densos na caracterização de minérios industriais. *REM: Revista Escola de Minas*, v. 63, n. 3, 2010.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global critical minerals outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- LIN, C. L.; MILLER, J. D.; LIN, X. Quantitative mineralogical characterization by automated scanning electron microscopy. *JOM – Journal of Minerals, Metals and Materials Society*, v. 39, n. 11, 1987.
- LONDON, D. Pegmatites. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 2008.
- LONDON, D. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. *Lithos*, v. 324–325, 2018.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (org.). Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2010.
- SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2007.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/CPRM. Tipologia e caracterização dos pegmatitos litíferos do Médio Rio Jequitinhonha. Belo Horizonte: CPRM, 2022.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Mineral commodity summaries: lithium. Reston, VA: U.S. Department of the Interior, 2024.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. Wills' mineral processing technology. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.