

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E TECNOLÓGICA DO CONCENTRADO DE ESPODUMÊNIO *

Caroline Rodrigues dos Santos Brigido¹

Reiner Neumann²

Paulo Fernando Almeida Braga³

Resumo

O lítio é essencial para a economia de baixo carbono, e tem aplicação intensiva em produtos de alta tecnologia. Os minérios de lítio têm sido alvo de busca e as exportações brasileiras de seus minerais têm crescido significativamente. O uso crescente deste metal na produção de baterias recarregáveis de veículos elétricos e equipamentos eletrônicos pessoais tem despertado um interesse mundial pela extração de minérios litiníferos. O lítio é encontrado em salmouras e em rochas pegmatíticas, sendo extraído no Brasil principalmente do minério de espodumênio. O presente trabalho realizou uma caracterização tecnológica, e para isto, foram conduzidos ensaios de classificação, análises de difratometria de raio X, fluorescência de raio X, perda ao fogo, microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado. Além disso, foram realizados ensaios de tratamento térmico para analisar o comportamento do espodumênio em diferentes temperaturas, pois acima de 1.000°C ocorre transformação de fase. Para a remoção dos minerais associados, foi empregada a separação gravimétrica em meio denso, resultando na eliminação de 11,7% desses minerais e alcançando uma concentração de 98,5% de espodumênio na amostra. Posteriormente, após a etapa de concentração, o espodumênio foi submetido à análise termogravimétrica, permitindo identificar as temperaturas de perda de massa do mineral.

Palavras-chave: Lítio; Espodumênio; Rochas Pegmatíticas; Concentração

MINERALOGICAL, CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SPODUMENE CONCENTRATE

Abstract

Lithium is essential for the low carbon economy, and has intensive application in high-technology products. Lithium ores have been the target of exploration, and Brazilian exports of its minerals have grown significantly. The increasing use of this metal in the production of rechargeable batteries for electric vehicles and personal electronics has sparked worldwide interest in the extraction of lithiniferous ores. Lithium is found in brines and pegmatite rocks, and is extracted in Brazil mainly from spodumene ore. The present work carried out a technological characterization including classification tests, X-ray diffractometry, X-ray fluorescence, loss on ignition, scanning electron microscopy and inductively plasma optical emission spectrometry analyzes. Furthermore, heat treatment tests were carried out to analyze the behavior of spodumene at different temperatures, as phase transformation occurs above 1.000°C. To remove the associated minerals, gravimetric separation in a dense medium was used, resulting in the elimination of 11.7% of these minerals and reaching a concentration of 98.5% of spodumene in the sample. Subsequently, after the concentration stage, the spodumene was subjected to thermogravimetric analysis, allowing the mineral's mass loss temperatures to be identified.

Keywords: Lithium; Spodumene; Pegmatite Rocks; Concentration

- ¹ *Engenheira Metalúrgica e de Materiais, Dr^a. bolsista, Coordenação de Processamento Mineral - COPTM, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro-RJ e Brasil.*
- ² *Geólogo, Dr., Pesquisador, Setor de Caracterização Tecnológica, Coordenação de Análises Minerais, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro-RJ e Brasil.*
- ³ *Engenheiro Químico, Dr., tecnologista, Coordenação de Processamento Mineral - COPTM, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro-RJ e Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O mundo está passando por uma transição energética para uma economia de baixo carbono, impulsionado por preocupações com as mudanças climáticas, poluição do ar e segurança energética. Alterações no setor de transporte afetarão profundamente a vida diária de bilhões de pessoas em todo o mundo. Muitas nações estão planejando a substituição de motores à combustão interna (ICEs) para veículos elétricos (EVs) [1-3].

Alguns metais estratégicos usados na fabricação de produtos de altas tecnologias vêm sendo amplamente explorados, como o lítio, o cobre, o cobalto e o níquel. Contudo, os recursos minerais relacionados são encontrados em poucas regiões do mundo e geralmente em locais com conflitos sociais. Dentre estes metais, o lítio vem se destacando principalmente para a produção de baterias recarregáveis de equipamentos eletrônicos pessoais, veículos elétricos (EVs) e sistemas de armazenamento de energia (ESS) [4].

O lítio ocorre na natureza majoritariamente na forma de silicatos ou fosfatos. Podemos encontrá-lo em solução nas salmouras, que representam as maiores reservas mundiais desse elemento/metalo (Salar de Atacama, no Chile; Salar Del Hombre Muerto, na Argentina; Salar de Uyuni, na Bolívia; e outros na China). Também o encontramos em pegmatitos, como espodumênio (principal fonte de lítio no Brasil, Austrália e Canadá), lepidolita e ambligonita. Outras fontes são a água do mar e argilas litiníferas (hectorita) [5]. Além dos pegmatitos e das salmouras é possível encontrar lítio em águas subterrâneas salinas e camadas do pré-sal [6].

A extração do lítio de pegmatitos, abandonada na década de 1990, tem-se viabilizado em função de um aumento gradativo nos preços e pela pureza do carbonato de lítio produzido a partir de minerais. Nas últimas décadas, a crescente demanda por lítio no mercado internacional tornou-se cada vez mais visível [7]. Na Tabela 1 são apresentadas algumas fontes de lítio, reservas e produção comercial.

Tabela 1. Características gerais, recursos, fontes e reservas de lítio.

| Informações | Dados |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fontes de lítio | - Salmouras continentais; - Depósitos sedimentares; - Rochas Pegmatíticas; - Geotérmicas continentais; - Água Marítima |
| Reservas e recursos de lítio | - Reservas mundiais: 28 x 10 ⁶ t de lítio contido - Recurso mundial: 109 x 10 ⁶ t de lítio contido |
| Produtores | - Depósitos de rochas: Austrália, China e Brasil; - Depósitos de salmouras: Chile, Argentina, Bolívia e China; |
| Produção em 2023 | - Produção mundial: ~ 180.000 t de lítio contido |

Fonte: Adaptado de LUONG e TRAN, 2022 [3]; USGS, 2024[8].

A maioria dos depósitos de salmouras são encontrados na América do Sul e estima-se que o recurso mundial de lítio seja 109 milhões de toneladas, sendo a maior produção proveniente da extração do lítio de minérios [9-10]. No caso das reservas de lítio no Brasil, este mineral ocorre na Província Pegmatítica Oriental do Brasil, que abrange os estados de Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo e Rio de

Janeiro [11]. O espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) é classificado dentro do grupo dos piroxênios, constituídos de cadeias simples de tetraedros de sílica, geralmente está associado ao quartzo e a albita, com estrutura monoclinica, de brilho vítreo e densidade relativa variando de 3,15 a 3,20 [12-13]. O minério de espodumênio quando concentrado alcança teores de óxido de lítio (Li_2O) em torno de 6,0%, e é comercializado principalmente na forma de concentrado ou dos compostos de hidróxido de lítio monohidratado ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) e carbonato de lítio (Li_2CO_3). Em 2023, o concentrado de espodumênio alcançou um valor FOB de US\$ 2113/t e o carbonato de lítio obteve cotação de US\$ 14583/t [14-16].

Tendo em vista a grande importância do minério de espodumênio, por ocasionar superávit na balança comercial do Brasil e ser estratégico para a produção de altas tecnologias, o presente estudo pretendeu realizar uma caracterização tecnológica do concentrado de espodumênio, a fim de contribuir para as pesquisas relacionadas ao processamento deste mineral.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Uma amostra do concentrado de espodumênio foi recebida no Laboratório de Minerais Industriais (LABMIN), do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), e foi manuseada para retiradas de amostras representativas. O processo de quarteamento/peneiramento foi realizado a seco com 1,0 kg, por meio de peneirador vibratório (ASSITEC/PVA). Um conjunto de 12 peneiras mais o fundo foi utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Todas as frações retidas nas peneiras foram pesadas e plotados em gráfico.

Para a análise química quantitativa por fluorescência de raio X (FRX) as amostras foram fundidas com tetraborato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) a 1.150°C na proporção de 1:10 em máquina de fusão EAGON 2 da PANalytical, utilizando iodeto de lítio (LiI) como desmoldante (0,1 g) e analisadas por WDXRF num equipamento da PANalytical, modelo Axios Max. A determinação de Perda ao Fogo (PPC) foi realizada no TGA-701 da LECO, utilizando 1,0 g de amostra. A umidade foi determinada a 107°C , enquanto a perda por calcinação foi determinada a 1.000°C .

A identificação da morfologia das partículas foi realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca FEI, modelo Quanta 400, em modo de alto vácuo. As amostras foram recobertas por prata e analisadas por elétrons retroespalhados. No microscópio eletrônico de varredura foi acoplado um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) para permitir a determinação qualitativa dos elementos químicos presentes na amostra.

A identificação dos minerais foi realizada por difratometria de raios X (DRX) pelo método do pó no equipamento Bruker-D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação $\text{CoK}\alpha$ (40kV/40mA), com passo de $0,02^\circ 2\theta$, tempo de contagem de 184 segundos por passo e coletados de 5 a $105^\circ 2\theta$. A interpretação qualitativa do espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF04 no software Bruker Diffrac.Plus. A identificação química foi realizada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) no equipamento de marca Horiba Jobin Yvon, com vista de observação radial do plasma para determinação direta.

O tratamento térmico foi realizado em duas etapas, a primeira variando a temperatura de 900 a 1.100°C , com o tempo de residência fixo de 30 min da

amostra no forno mufla. Após a definição da temperatura ideal, ela foi fixada e variou-se o tempo de residência de 10 - 60 min. O aquecimento da amostra foi realizado em forno mufla da Labor de modelo SP-1200. Cada amostra foi analisada por DRX para a identificação da mudança de fase de α para β .

A separação em meio denso foi realizada com bromofórmio (CHBr_3) P.A com densidade de $2,890 \text{ g mL}^{-1}$ a 20°C e solubilidade em água de $0,319 \text{ g/100 mL}$. Em um becker foi adicionado 150 mL de bromofórmio e 5,0 g de espodumênio, onde o afundado e o sobrenadante foram separados para posteriores análises.

Para a análise termogravimétrica foi usado o equipamento Netzsch modelo 449F3. A amostra de espodumênio foi analisada na faixa de temperatura de 30 a 1.100°C , com tamanho de partícula inferior a $10 \mu\text{m}$ e em atmosfera de $\text{N}_2(\text{g})$.

3 Resultados e discussão

3.1 Distribuição granulométrica

O material retido em cada peneira foi coletado e pesado. Em seguida, foi construída uma curva do produto passante acumulado (%), conforme mostrado na Figura 1. Foi observado que o P50 está abaixo de 1,7 mm.

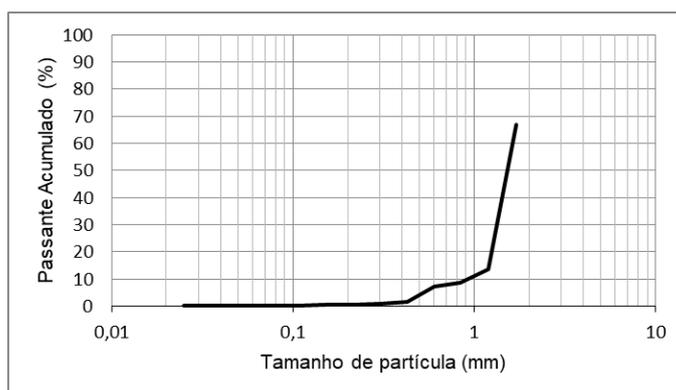


Figura 1. Distribuição granulométrica do minério de espodumênio. Fonte: Autores.

3.2. Caracterização por difratometria de raio X

Na Figura 2 é apresentado o difratograma de raio X do concentrado de espodumênio. Foram identificados picos de espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), quartzo (SiO_2), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e clorita ($(\text{Mg,Al,Fe})_{12}[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$). No trabalho de Dessemond *et al.* (2020) foram estudadas as características das fases do espodumênio, e assim como no presente trabalho realizaram uma análise por DRX do α -espodumênio e identificaram picos de albita e quartzo [17].

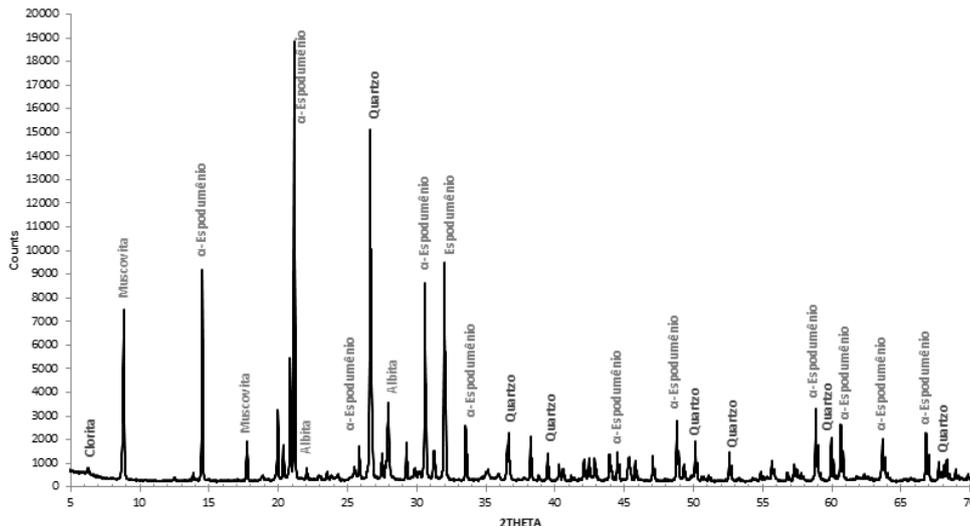


Figura 1. DRX da amostra de α -espodumênio. Fonte: Autores.

3.3 Caracterização química por Fluorescência de Raio - X (FRX), Perda por Fogo (PPC) e Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)

A amostra de espodumênio foi analisada por FRX, PPC e ICP-OES para a identificação dos compostos presentes, cujos resultados são apresentados na Tabela 02. Foi possível observar que o SiO_2 (63,6%) e o Al_2O_3 (21,1%) são os compostos predominantes na amostra, já que o espodumênio é um aluminossilicato. Estes resultados são similares aos apresentados pelo Instituto de Geociências-USP cuja composição do espodumênio foi de Li_2O (8,0%), Al_2O_3 (27,4%) e SiO_2 (64,6%) [18].

Tabela 02. Resultados da análise química.

| Analitos | Li_2O | Na_2O | MgO | Al_2O_3 | SiO_2 | P_2O_5 | SO_3 | K_2O | CaO | TiO_2 | MnO |
|----------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|----------------|------------------------|---------------|----------------------|--------------|----------------|--------------|
| (%) | 4,5 | 1,8 | 1,8 | 21,1 | 63,6 | 1,1 | 0,19 | 1,6 | 1,3 | 0,61 | 0,32 |

| Analitos | Fe_2O_3 | SnO_2 | NiO | CuO | ZnO | Rb_2O | SrO | ZrO_2 | Nb_2O_5 | Cl | PPC |
|----------|-------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|----------------|-------------------------|------|------|
| (%) | 4,8 | 0,11 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 1,45 |

Fonte: Autores.

3.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com EDS acoplado.

A Figura 3 é a imagem de elétrons secundários do espodumênio, que é prismático, achatado e com estrias. Na análise MEV/EDS o elemento lítio não é identificável, devido a baixa energia de transição. Contudo os elementos associados são passíveis de identificação, tais quais, oxigênio (O), sódio (Na), alumínio (Al), silício (Si) e Ferro (Fe), que também ocorrem nos minerais associados ao espodumênio, presentes na amostra, como albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e clorita ($(\text{Mg,Al,Fe})_{12}[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$).

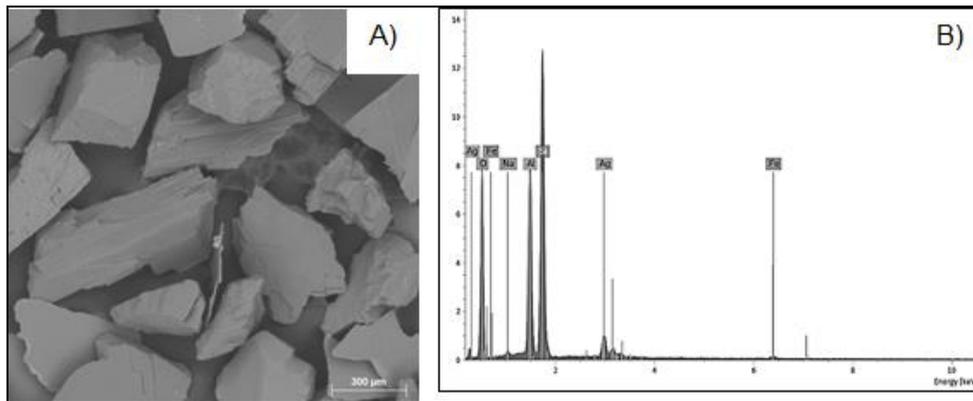


Figura 2. A) Micrografia obtida pelo microscópio eletrônico de varredura B) Identificação de elementos realizada pelo Energy dispersion X-ray fluorescence system acoplado ao MEV. Fonte: Autores.

3.5 Tratamento térmico do espodumênio

O tratamento térmico foi realizado em duas etapas, a primeira variando a temperatura com o tempo fixo de 30 min de residência da amostra em forno mufla, e após a definição da temperatura de melhor resultado, foi fixada a temperatura e variou-se o tempo de residência de 10 - 60 min.

Nos estudos de análise térmica em temperatura de 25°C (Figura 4-a), outros minerais foram encontrados associados ao espodumênio, tais quais a muscovita (Ms), clorita (Chl) e albita (Ab). Na temperatura de 900°C (Figura 4-b) não foi observada a clorita e houve redução significativa do pico da muscovita, e corroboram os resultados encontrados no trabalho de Simões, (2021) onde foram observados picos expressivos de espodumênio e quartzo [20]. Na Figura 4-c, com aquecimento de 950°C, não houve alterações perceptíveis no difratograma. Na Figura 4-d foi verificado que o α -espodumênio sofreu transformação para o β -espodumênio a partir de 1.000°C. Estes resultados são similares aos apresentados por IliA, (2023) que observaram essa alteração de fase em 1.080°C [21]. Nos estudos de Jeppson *et. al*, (1978) foi identificado que nesta temperatura a densidade do lítio é reduzida para 0,434 g cm⁻³ [22]. Picos maiores de β -espodumênio foram identificados na Figura 4-e, indicando que em 1050°C também ocorre mudança de fase. Entretanto na temperatura de 1.100 °C ocorre à formação de virgilita, como apresentado na Figura 4-f, também observado por MINMICRO, (2023B) [19]. Conclui-se que a transformação do sistema cristalino do minério de fase de alfa (α) para beta (β) ocorreu a partir de 1.000°C.

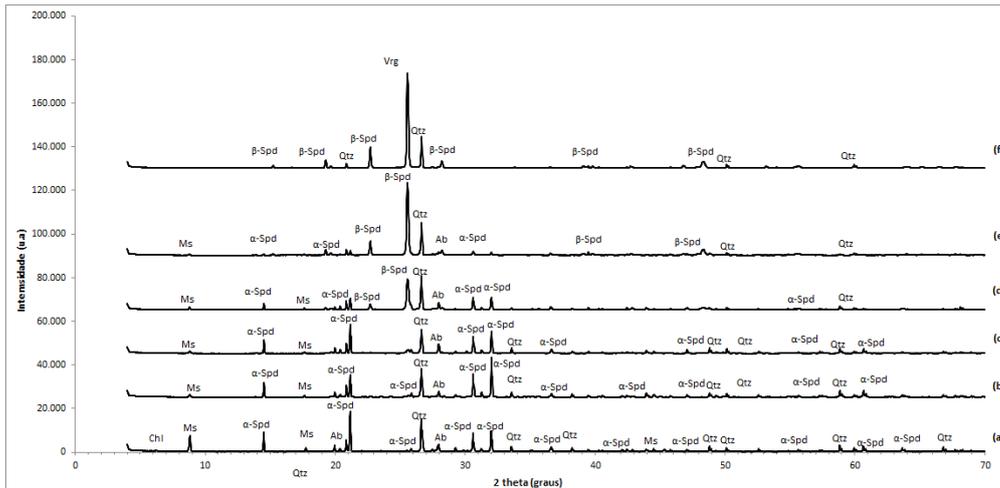


Figura 3. DRX do tratamento térmico do α -espodumênio durante 30 min. A) 25°C, B) 900°C, C) 950°C, D) 1.000°C, E) 1.050°C, F) 1.100°C. Sendo: Vrg: Virgilita, Ms: Muscovita, Chl: Clorita, Ab: Albita, Qtz: Quartzo, β -Spd: Beta-Espodumênio e α -Spd: Alfa-Espodumênio. Fonte: Autores.

O tempo de residência da amostra do minério no forno mufla foi variado entre 10 a 60 min, com a mesma temperatura de 1.100 °C. Os resultados de DRX de cada amostra após tratamento são apresentados na Figura 5. Foi possível observar que os maiores picos encontrados nos tempos de 10 min e 20 min são do β -espodumênio (Figura 5 (a)-(b)), contudo nos tempos de 30 e 60 min foram identificados os picos de virgilita (Figura 5 (c)-(d)). A virgilita tem estrutura hexagonal e seu aparecimento era esperado, conforme o diagrama de fases dos diferentes aluminossilicatos de lítio, apresentado no trabalho de Barbosa, (2021) [23]. Estes resultados indicam que menores tempos de residência (10 min) já são suficientes para a decrepitação do espodumênio, reduzindo os custos operacionais de energia térmica. A fase de β -espodumênio torna o lítio disponível para a extração e a virgilita é a fase vítrea que impossibilita a extração de lítio.

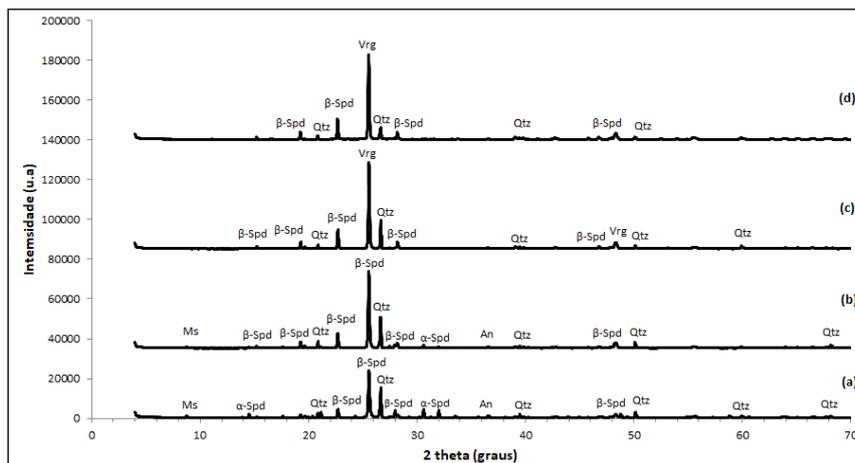


Figura 4: DRX do tratamento térmico do α -espodumênio de 10 - 60 min a 1.100°C. (a) 10 min, (b) 20 min, (c) 30 min e (d) 60 min. Sendo: Vrg: Virgilita, Ms: Muscovita, An: Anortita, Qtz: Quartzo, β -Spd: beta-espodumênio e α -Spd: alfa-espodumênio. Fonte: Autores.

3.6 Separação em meio denso em laboratório

Após a separação em meio denso a amostra foi analisada por DRX para identificar a concentração do mineral de interesse (espodumênio) e a eficiência

deste processo. Os resultados podem ser observados na Tabela 3. Foi verificado que a concentração de espodumênio na amostra aumentou 11,7%, com a remoção total da muscovita e albita, indicando que este método de separação é eficiente para a concentração do espodumênio.

Tabela 3. Composição do mineral por análise de DRX do espodumênio, antes e depois da separação em meio denso.

| Minerais | Antes | Depois |
|---------------|--------|--------|
| α-espodumênio | 86,8 % | 98,5% |
| Quartzo | 8,8 % | 0,8% |
| Clorita | 1,4 % | 0,7% |
| Muscovita | 0,2 % | - |
| Albita | 2,8 % | - |

Fonte: Autores.

3.7 Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 6 mostra a Análise Termogravimétrica (TGA) do α-espodumênio, e foi possível perceber perdas de massas em 100 °C, 230 °C, 260 °C. Após a temperatura de 600°C houve estabilidade, assim como os resultados obtidos por Simões, (2021) [20]. O α-espodumênio é encontrado em baixas temperaturas (< 500°C, monoclinico), mas as suas formas polimorfas, o β-espodumênio (>500°C, tetragonal) e o γ-espodumênio (> 900°C, hexagonal) são observados em temperaturas maiores e podem ter sido responsáveis pelas variações obtidas na curva de TDG [19,24].

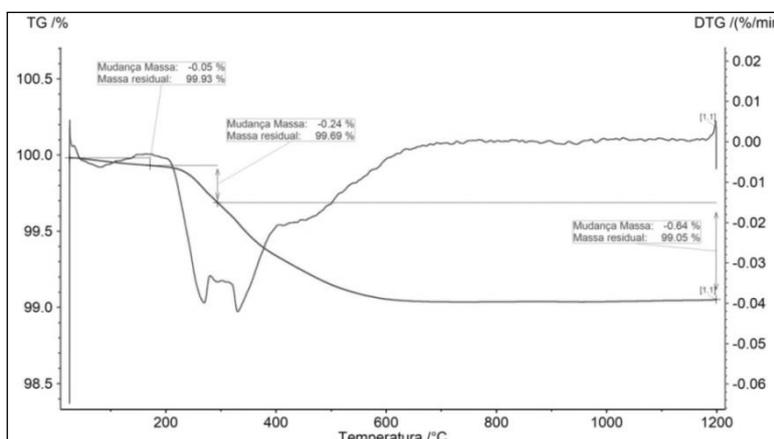


Figura 5. Análise Termogravimétrica Derivada (TDG) do α- espodumênio com pureza de 98,5%. Fonte: Autores.

4 CONCLUSÃO

O espodumênio de rochas pegmatíticas, com teor teórico de Li_2O no concentrado em torno de 8,0%, é considerado um mineral estratégico para o Estado brasileiro. Geralmente o espodumênio está associado a quartzo, albita, clorita e muscovita. Em temperaturas acima de 1.000 °C sofre alteração na estrutura cristalina e, na forma de β-espodumênio, o lítio está disponível para a extração. Em temperatura de 1.100°C o espodumênio é alterado para virgilita, uma fase vítrea que impossibilita a obtenção de Li_2O , neste sentido o tratamento térmico do espodumênio não pode alcançar temperaturas de 1.100°C ou superiores, pois

inviabiliza a extração de Li_2O . A separação em meio denso com bromofórmio foi eficaz para a remoção dos minérios associados ao espodumênio, com concentração de 98,5%.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação pelo incentivo à pesquisa no Brasil, que por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) permitiu o desenvolvimento desta pesquisa fomentada com bolsas do Programa de Capacitação Institucional, PCI-CETEM/MCTI.

REFERÊNCIAS

- 1 BRASIL, 2021. Resolução nº 2 de 2021. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Disponível em: www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-lanca-relatorio-anual-do-comite-interministerial-de-analise-de-projetos-de-minerais-estrategicos/resolucao2CTAPME.pdf . Acessado em: 03 de maio de 2024
- 2 SPIESS, M. (2023). Money Times. Petróleo branco: Uma das oportunidades da década. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/petroleo-branco-uma-das-oportunidades-da-decada/>. Acessado em: 01 de junho de 2023.
- 3 LUONG, & TRAN. (2022). Paradox over Electric Vehicles, Mining of Lithium for Car Batteries. *Energies*(15), 25.
- 4 KARRECHA A., M.R. AZADIA, M. ELCHALAKANIA, M.A. SHAHINB, A.C. SEIBIC, 2020. A review on methods for liberating lithium from pegmatites. *Minerals Engineering* v. 145, p. 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106085>
- 5 BRUNHARA, G. F. e BRAGA, P. F.A. (2021). Tecnologias de extração de lítio de pegmatitos. Rio de Janeiro/RJ: Centro de Tecnologia Mineral.
- 6 LOPES, M. D. (2019). LÍTIO - CARACTRÍSTICAS, OCORRÊNCIAS, PRODUÇÃO E USO. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia de Minas. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- 7 BRIGIDO, C. R. DOS S.; BATISTA, T. B; GARCIA, I. J.; BRAGA, P. F. A., 2023. Aspectos do mercado de lítio no Brasil. In: XXI Simpósio de Mineração da ABM WEEK 7 ed. 01-03 de Agosto, São Paulo, SP-Brasil.
- 8 UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries. 2024. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf> . Acessado em: 09 de Maio de 2024.
- 9 EYZAGUIRRE, A. G., ROJAS, F. D., & LUCERO, V. G. (2023). El mercado de litio Desarrollo reciente y proyecciones al 2035. Cochilco Ministerio de Minería. Disponível em: www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20del%20Litio%20-%20Proyecciones%20al%202035%20-06.06.2023l.pdf. Acessado em: 07 de Agosto de 2023.
- 10 BENCHMARK MINERAL INTELLIGENCE. (2023). Hard rock lithium vs. brine – how do their carbon curves compare?. Disponível em: <https://source.benchmarkminerals.com/article/hard-rock-vs-brine-how-do-their-carbon-curves-compare> . Acessado: 09 de Maio de 2024.
- 11 PAES, V. J. de C.; SANTOS, L. D.; TEDESCHI, M. F.; BETIOLLO, L. M. (2016). Avaliação do potencial do lítio no Brasil: área do Médio Rio Jequitinhonha, Nordeste de Minas Gerais: texto explicativo e mapas. Belo Horizonte: CPRM.
- 12 ANELLI, L., LEME, J., OLIVEIRA, P., & FAIRCHILD, T. (29 de Agosto de 2020). Piroxênios. (S. d. IGc-USP, Produtor) Fonte: Geociências USP: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/inossilicatos/piroxenios/>

- 13 MINMICRO. (2023A). ESPODUMÊNIO. Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Espodum%C3%AAnio.pdf> Acessado em: 03 de Maio de 2024
- 14 SISTEMA INTEGRADO DE COMÉRCIO EXTERIOR (SISCOMEX), 2022. Exportação e Importação Geral. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/79556>. Acessado em: 03 de Maio de 2024
- 15 EUROPEAN METALS HOLDINGS LIMITED. SUCCESSFUL PRODUCTION OF LITHIUM HYDROXIDE, 2024. Disponível em: <https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/d8442cf3-f4b.pdf>. Acessado em 03 de Maio de 2024.
- 16 BENCHMARKARAK, 2024. Lithium Prices Index. Disponível em: <https://www.benchmarkminerals.com/price-assessments/lithium/?tab=chart>. Acessado em: 03 de Maio de 2024.
- 17 DESSEMOND, C.; SOUCY, G.; HARVEY, J.-P.; OUZILLEAU, P.(2020). Phase Transitions in the α - γ - β Spodumene Thermodynamic System and Impact of γ -Spodumene on the Efficiency of Lithium Extraction by Acid Leaching. Minerals 2020, 10, 519. <https://doi.org/10.3390/min10060519>
- 18 GEOCIÊNCIAS, 2024. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo-SP. Espodumênio. Geociências. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/inossilicatos/espodumenio/> Acessado em: 03 de Maio de 2024.
- 19 MINMICRO. (2023B). EUCRYPTITA. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRS. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Eucryptita.pdf> Acessado em: 03 de Maio de 2024.
- 20 SIMÕES, A. L. (2021). Síntese de geopolímeros a partir da caulinita, metacaulinita e espodumênio e sua aplicação como adsorvente de amoxicilina. Universidade Federal de Minas Gerais, Química. Belo Horizonte: Dissertação (mestrado).
- 21 INTERNATIONAL LITHIUM ASSOCIATION - ILiA, 2023. Lithium. Disponível em: International Lithium Association: <https://lithium.org/lithium/> Acessado em 03 de Maio de 2024.
- 22 JEPPSON, D. W., BALLIF, J. L., YUAN, W. W., & CHOU, B. E. (1978). Lithium literature review: Lithium's properties and interactions. Richland, WA, WA, EUA: Hanford Engineering Development Laboratory.
- 23 BARBOSA, C. C. (2021). Caracterização estrutural, mineralógica e química mineral do pegmatito Bananal: um depósito de lítio do Campo Pegmatítico de Curalinho, Salinas, MG. 2021. 127 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- 24 LIMA, H. R. (2013). Síntese e caracterização do $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ por novas rotas de produção. Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Pós-Graduação em Física. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe.