


CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE LÍTIO PEGMATÍTICO DA MINA DA CBL, ARAÇUAÍ – MG

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-397>

Data de submissão: 24/11/2024

Data de publicação: 24/12/2024

Marcos Júnio Alves dos Santos

Engenheiro de Minas, Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM),
Janaúba, Minas Gerais

E-mail: marcos.junio@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6291234901087347>

Ana Carolina Lisboa Bastos

Engenheira de Minas, Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM),
Janaúba, Minas Gerais

E-mail: carolina.bastos@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3590233893743696>

Dienes Rodrigues dos Santos

Graduando do Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e
Mucuri (UFVJM), Janaúba, Minas Gerais

E-mail: dienes.santos@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6432383059488669>

Luis Gustavo Cunha Nogueira

Graduando do Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e
Mucuri (UFVJM), Janaúba, Minas Gerais

E-mail: luis.gustavo@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0922181074511180>

Talita Vitória Ferreira de Souza

Graduando do Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e
Mucuri (UFVJM), Janaúba, Minas Gerais

E-mail: souza.talita@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8387731018205010>

Leo Leonardo Azevedo Sá Alkmin

Professor do Curso de Engenharia de Minas, Mestre em Geologia. Universidade Federal dos vales
do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Janaúba, Minas Gerais

E-mail: leonardo.alkmin@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1245730742641053>

Bárbara Gonçalves Rocha

Professora do Curso de Engenharia de Minas, Doutora em biocombustíveis e mestre em tecnologia
mineral. Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Janaúba, Minas

Gerais

E-mail: barbara.rocha@ufvjm.edu.br

ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7316107942989770>

RESUMO

O lítio é um metal consideravelmente leve em relação a outros metais. Devido ao seu elevado calor específico, possui diversas aplicações relacionadas à transferência de calor, enquanto seu notável potencial eletroquímico e alta densidade energética o tornam amplamente utilizado em baterias. Por sua elevada reatividade, não é encontrado na natureza em sua forma elementar, ocorrendo principalmente em salmouras de lítio e pegmatitos. No Brasil, a presença do lítio é observada em depósitos de pegmatito, com importantes corpos mineralizados localizados no Vale do Jequitinhonha, no estado de Minas Gerais. Este trabalho tem como objetivo realizar um levantamento de informações através de análise químicas, mineralógicas e granulométricas do pegmatito litífero advindo da Companhia Brasileira de Lítio (CBL), localizada no município de Itinga/MG, comparando com informações disponíveis na literatura. Os resultados demonstraram que a mineralogia principal é constituída principalmente de espodumênio e quartzo, apresentando também frações de apatita e pirita, entre outros minerais. Acompanhando o crescimento da demanda no mercado nacional e internacional por minerais de lítio, especialmente para uso em sistemas tecnológicos, como baterias, faz-se cada vez mais necessário se entender a disposição natural dos minérios exploráveis para melhor aproveitamento na mineração.

Palavras-chave: Granulometria. Difração de Raios X. MEV. Mineração.

1 INTRODUÇÃO

As reservas de lítio na América do Sul concentram-se predominantemente em salmouras continentais e corpos pegmatíticos, impulsionando a economia global devido à crescente demanda na indústria de baterias e tecnologias limpas [1]. Sendo o mais leve dos metais, o lítio apresenta número atômico 3, massa atômica de 6,939 u e abundância na crosta terrestre de 12 ppm [2]. Embora cerca de 150 minerais contenham lítio, apenas quatro são economicamente viáveis para a produção de compostos de lítio, são eles: espodumênio, lepidolita, petalita e amblygonita. Os principais produtos comercializados são o carbonato de lítio (Li_2CO_3) e o hidróxido de lítio (LiOH), com variações nas propriedades de acordo com suas aplicações específicas [2].

Os pegmatitos desenvolvidos em rochas ígneas intrusivas graníticas, são compostos por quartzo, feldspato, biotita, muscovita, afofita e minerais como berilo, cassiterita, amblygonita, espodumênio, tantalitacolumbita e turmalinas coloridas. Além das variedades graníticas, existem definições que abrangem composições ultramáficas, máficas e sieníticas. O termo "pegmatito" também é usado para descrever fundidos residuais tardios com alta concentração de voláteis dissolvidos. Esses pegmatitos são fontes importantes de recursos minerais, incluindo elementos raros e pedras preciosas como morganita e água-marinha, além de minerais como hiddenita e kunzita [3].

Destaca-se o lítio como elemento raro presente nos pegmatitos, impulsionado pela alta demanda devido ao rápido desenvolvimento tecnológico. O elemento lítio (Li) é um metal alcalino com características físicas e químicas distintas. Com densidade excepcionalmente baixa e o menor peso molar de todos os metais, bem como alto potencial eletroquímico superando o do eletrodo padrão de hidrogênio [4], tornam esse elemento um insumo de suma importância para a indústria mundial, sobretudo no que se refere ao setor de produção de baterias.

O espodumênio, de composição química $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, é um aluminossilicato de lítio. Pertencente ao grupo dos piroxênios, no entanto, não forma séries isomórficas com outras espécies desse grupo [5]. O mineral é incolor em seu estado puro, apesar de existirem variedades coloridas conforme as impurezas presentes, das quais as mais conhecidas são a kunzita, de cor rosa devida ao manganês e a hiddenita, de cor verde atribuída ao elemento Cromo [6].

As salmouras continentais e rochas duras são fontes principais para exploração de lítio, com alguns países, como a Austrália, focando na produção a partir de rochas, especialmente o espodumênio [1]. A América do Sul, especialmente o triângulo Argentina, Bolívia e Chile, representa 57 % dos depósitos de lítio do mundo [7]. O Brasil possui ocorrências associadas a rochas pegmatíticas nos estados de Minas Gerais, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, com minerais como amblygonita, espodumênio, petalita e lepidolita [2]. No Brasil as principais reservas de minérios de lítio estão

localizadas no Vale do Jequitinhonha, em Minas Gerais, especificamente nos municípios de Araçuaí e Itinga [8]. O Orógeno Araçuaí, desenvolveu-se no final do neoproterozóico, marcado pelo término do ciclo brasileiro e com a amalgamação do Gondwana Ocidental, situado entre o Cráton São Francisco e a Margem Continental Atlântica na margem leste brasileira com idades que vão de 630-480 Ma [9].

A extração mineral na unidade de Araçuaí pela Companhia Brasileira de Lítio (CBL) é realizada por meio de lavra subterrânea nos pegmatitos pelo método de *sublevel stoping*, de onde o minério é transportado até a britagem por pás carregadeiras, na Mina da Cachoeira no baixo vale do Rio Piauí, afluente do Jequitinhonha [2,10]. Após a extração, o minério passa por um processo de beneficiamento, resultando na obtenção de espodumênio e feldspato como produtos. O espodumênio é transportado para a fábrica localizada em Divisa Alegre/MG, onde ocorre a produção de carbonato e hidróxido de lítio. O processamento do minério lavrado inicia-se com as etapas de classificação/cominuição, conduzidas por britadores de mandíbulas e cônicos. O fechamento do circuito é realizado por peneiras vibratórias. A etapa de concentração mineral é efetuada com o minério na granulometria de 6,35 a 19,05 mm, apresentando um teor de 1,5 % de Li_2O . Esse processo ocorre em um circuito utilizando ciclone de meio denso [8]. O hidróxido de lítio (LiOH) e o carbonato de lítio (Li_2CO_3) são as principais formas industriais de lítio, obtidos a partir de minerais e salmouras ricos em lítio [11]. O carbonato de lítio tem sido a principal produção a partir de salmouras. O hidróxido de lítio é o segundo em consumo, podendo ser obtido diretamente de salmouras, concentrados ou a partir do carbonato de lítio [12].

Assim, a América do Sul é crucial devido às vastas reservas de lítio, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento do novo padrão energético e apresentando potencial significativo. Investir nesse recurso estratégico pode trazer benefícios importantes para o continente contribuir para o bem-estar e prosperidade futura. Nesse âmbito, o objetivo principal desse trabalho foi avaliar as características mineralógicas e químicas do minério de lítio do município de Araçuaí/MG, proveniente da mineração realizada pela Companhia Brasileira de Lítio (CBL), trazendo resultados adquiridos em laboratório das caracterizações tecnológicas a fim de ampliar as informações associadas ao minério litífero.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de pegmatito litífero foram gentilmente disponibilizadas por uma empresa localizada no município de Itinga (CBL - Companhia Brasileira de Lítio), região nordeste de Minas

Gerais, que realiza a extração dos pegmatitos litiníferos na Mina da Cachoeira, onde o minério de espodumênio é dominante.

2.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

O material foi submetido no beneficiamento mineral pela operação de britagem, no Laboratório de Operações Minerárias do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – IFNMG. O procedimento teve como finalidade a fragmentação de blocos de minérios do *Run Of Mine* - ROM, que é o minério proveniente da mina, levando-os à granulometria desejada para a utilização direta nos processos posteriores. Primeiramente, a amostra de pegmatito litinífero foi posicionada na abertura do britador de mandíbulas Brastorno Tormax 18x13 (BT.BMB) para a britagem. O material britado foi ensacado em saco plástico limpo, para evitar contaminações, e encaminhado para os devidos procedimentos e análises posteriores.

2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os ensaios de peneiramento foram utilizados com objetivo de classificar o material advindo do britador conforme o tamanho das partículas presentes na amostra, neste caso, no intuito de conhecer a distribuição granulométrica do pegmatito litinífero após britagem primária. Esta análise foi realizada no Laboratório de Operações Minerárias do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – IFNMG. Para os ensaios, a amostra advinda da etapa de britagem com peso total de 3430 gramas, foi disposta em um agitador de peneiras Abronzinox para seguir ao peneiramento a seco por 5 minutos com frequência de 5 Hz; utilizando-se peneiras da série Tyler com aberturas de 4,75 mm (4#); 2,36 mm (8#); 1,70 mm (10#); 1,40 mm (12#); 1,118 mm (14#); 0,297 mm (48#); e o último retido classificado como 0,250 mm (60#), como exemplificado na Figura 1.

Figura 1: Visão macroscópica do minério de lítio após peneiramento na escala de 4# até 60# (serie Tyler).



2.3 ANÁLISE MINERALÓGICA

Primeiramente a amostra selecionada (0,250 mm ou 60 #) foi homogeneizada pelo processo de quartejamento, para redução da quantidade de massa, obtendo-se uma fração de 145 g em peso como exemplificado na Figura 2. Três alíquota da amostra do pegmatito litinífero da faixa granulométrica escolhida foram retiradas e enviadas ao laboratório para análise mineralógica, através da técnica de difração de raios X. A estrutura cristalográfica foi determinada usando o método do pó, com um difratômetro da Shimadzu modelo XRD-6000 usando radiação monocromática CuK α ($\lambda = 0,15406$ nm - 40 kV e 30 mA), analisadas a uma taxa de varredura de 2,0 grau/ min cobrindo a escala 2 θ de 10-80°. Esta análise foi realizada em parceria com Laboratório Multiusuário de Microscopia Avançada (LMMA), no campus Diamantina da UFVJM. Para o tratamento dos dados obtidos foi utilizado o programa X'Pert HighScore Plus.

Figura 2: Quartejamento da amostra de minério de lítio na fração 60 # (serie Tyler).



2.4 ANÁLISE QUÍMICA

As alíquotas separadas para a análise mineralógica foram submetidas também a análise química e morfológica em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da HITACHI modelo TM-3000 com analisador EDS da OXFORD modelo SWIFT ED 3000. Essa análise também foi realizada em parceria com Laboratório Multiusuário de Microscopia Avançada (LMMA), no *campus* Diamantina da UFVJM. A figura 3 exemplifica as amostras enviadas.

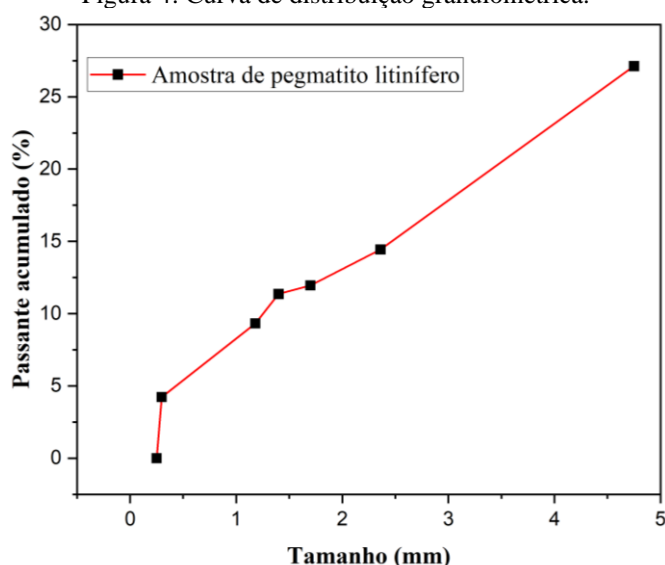
Figura 3: Aliquotas separadas da fração 60# para a análise mineralógica



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

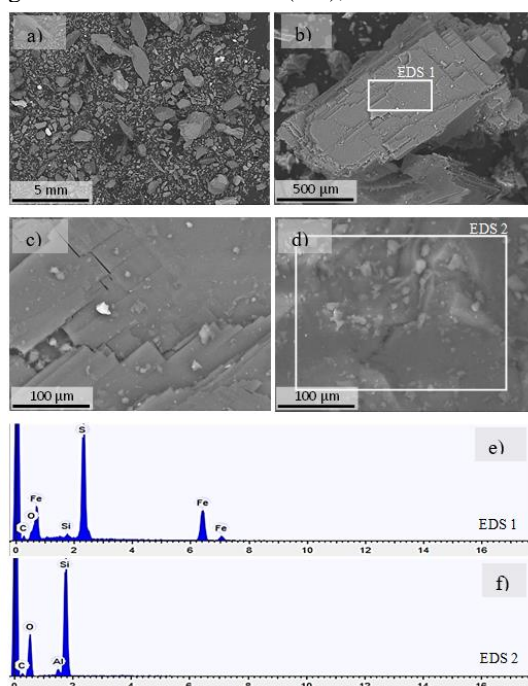
A Figura 4 apresenta a granulometria do peneiramento realizado a seco em laboratório, demonstrando um percentual maior (27,12 %) na faixa mais grossa, acima de 4,75 mm, enquanto a granulometria mais fina apresentou em torno de 5 % retidos abaixo de 0,250 mm. Segundo Braga *et al.* [12] o beneficiamento mineral realizado na Mina da Cachoeira pela CBL utiliza minério na granulometria de 6,35 mm a 0,8 mm com teor de 1,5% de Li_2O após britagem secundária, que segue para o ciclone de meio denso gerando um concentrado com cerca de 5% Li_2O , correspondendo a um enriquecimento de 3,3 vezes. O trabalho aqui proposto já demonstra ser possível conseguir resultados similares na granulometria citada por Braga *et al.*, com a britagem primária. A granulometria abaixo de 0,8 mm representa 9,33 % nas análises aqui realizadas, esse material fino não aproveitado desponta uma oportunidade para o desenvolvimento da flotação, que pode agregar valor significativo ao processo de beneficiamento [13].

Figura 4: Curva de distribuição granulométrica.



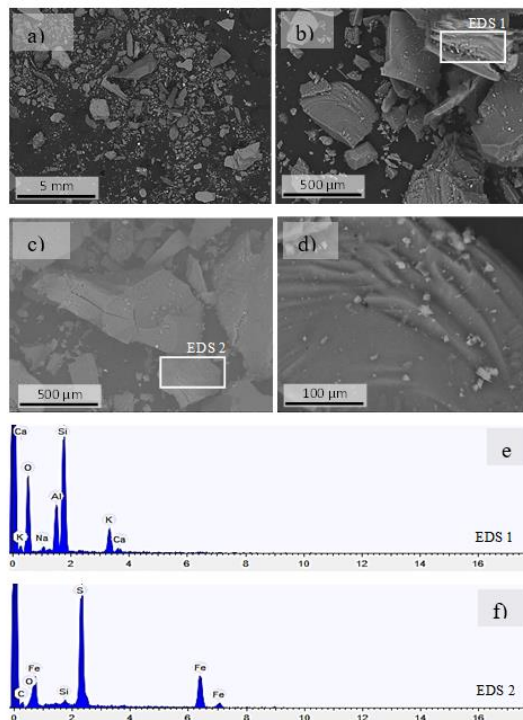
Após o quartejamento da faixa granulometria selecionada (60 #; 0,250 mm), 3 amostras foram retiradas, enumeradas e levadas a caracterização por MEV e EDS, onde a Figura 5, 6 e 7 apresentam imagens para as microrregiões das amostras 1, 2 e 3 respectivamente. As análises no MEV/EDS tiveram o objetivo de analisar as morfologias e as distribuições dos tamanhos das partículas. Na imagem de elétrons retroespalhados é notável partículas com granulometria variada e diferença nos tons de cinza.

Figura 5: Imagens MEV da amostragem 1 do minério de lítio (a-d), e análises EDS das microrregiões identificadas (e-f).



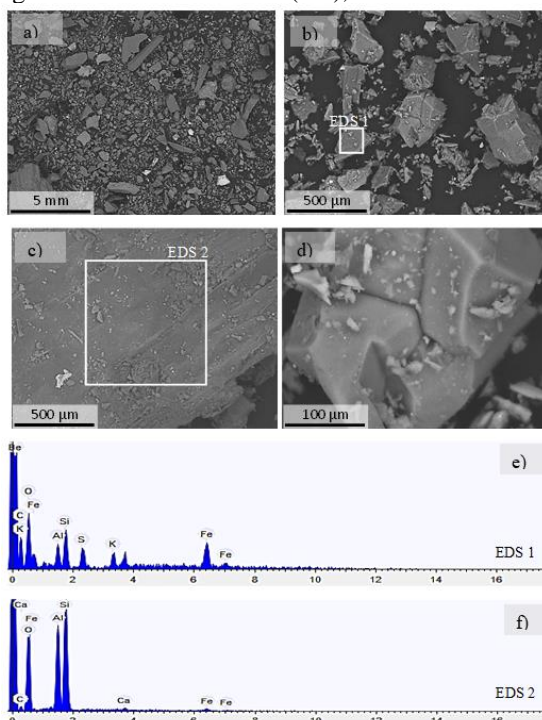
É possível observar nas imagens da Figura 5, amostra 1, granulometrias variadas que não ultrapassam o tamanho de 5 mm, como já esperado pela análise granulométrica feita. Alguns minerais se destacaram com um tom de cinza mais claro, e pela análise EDS observa-se a presença de ferro e enxofre, o que preliminarmente faz-se a entender que possa haver a presença de um sulfeto de ferro.

Figura 6: Imagens MEV da amostragem 2 do minério de lítio (a-d), e análises EDS das microrregiões identificadas (e-f).



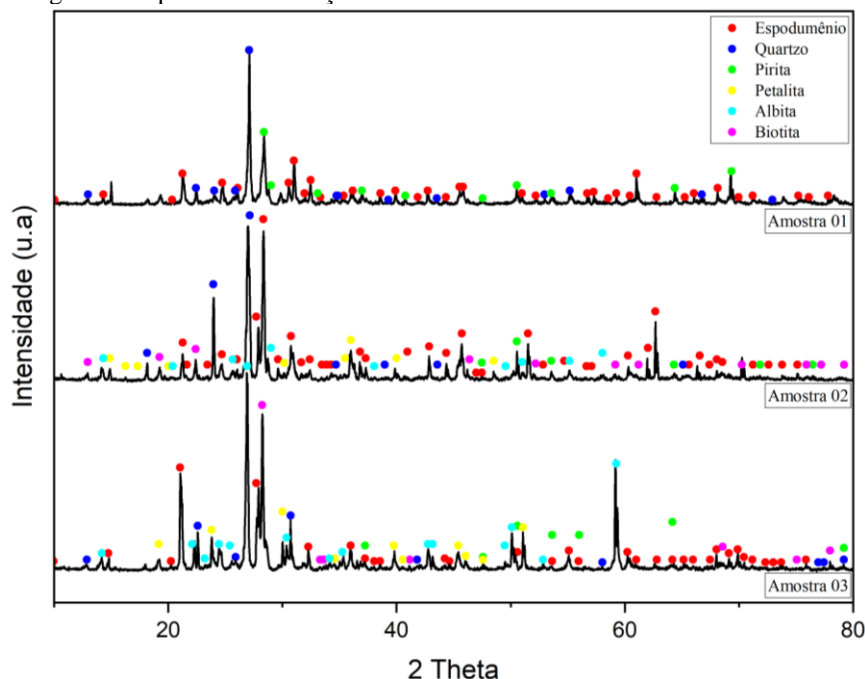
Para a amostra 2, na Figura 6, os resultados de granulometria bem como nos elementos identificados no EDS estão como esperado devido à similaridade das amostras. Porém, a mesma mostrou alguns traços para elementos como Sódio, Calcio e Potássio, indicando a formação de um possível Feldspato para o mineral estudado.

Figura 7: Imagens MEV da amostragem 3 do minério de lítio (a-d), e análises EDS das microrregiões identificadas (e-f).



A amostra 3, na Figura 7, mostrou resultado próximo a amostra 2, denotando também os mesmos elementos químicos já citados anteriormente. O minério aqui estudado é portador de Li_2O , no entanto a presença de Li, devido à sua baixa massa atômica ($6,941 \pm 0,002$ u), não é detectada pelo EDS. A identificação das fases minerais presentes nas diferentes amostragens foi determinada por difratometria de Raios-X, conforme mostrado nos difratogramas nas Figuras 8, 9 e 10. Como esperado, o Espodumênio é a fase mineral predominante em ambas.

Figura 8: Espectros de difração de Raios X da amostra 1 do minério de lítio.



Os resultados que os difratogramas de Raios-X exibem nas figuras confirmam que as amostras estudadas apresentam a mesma composição mineralógica majoritária, contendo Espodumênio e Quartzo. O difratograma de raios-X da amostra 1, Figura 8, apresentou picos característicos que possibilitaram verificar a presença de Espodumênio [$\text{Li}_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}$] e de Quartzo [SiO_2], bem como picos característicos para Pirita [FeS_2], sendo este último atribuído aos minerais com destaque de cor clara observado nas imagens MEV.

Os resultados das amostras 2 e 3, Figuras 9 e 10 respectivamente, obtiveram picos similares ao da amostra 1, confirmando a presença de Espodumênio, e mostrando também a presença de Quartzo e Pirita como principais minerais. Observa-se que essas amostragens obtiveram picos para Biotita do tipo Annita [$\text{Si}_{5.18}\text{Al}_{3.82}\text{Fe}_{5.14}\text{K}_{1.87}\text{O}_{24}$], Petalita [$\text{Si}_8\text{Li}_4\text{Al}_4\text{O}_{21}$] e Albita [$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}$], o que vem de encontro com os elementos Ca, Na e K obtidos nas suas análises EDS. Em seu trabalho Romero *et al.*

[10] menciona que os pegmatitos da Mina da Cachoeira são constituídos essencialmente por espodumênio, albita e quartzo.

Pela difratometria de Raios-X é possível visualizar ainda a composição percentual pelo número de picos característicos, conforme Tabela 1. Dessa forma, na análise DRX, foi verificado então composição majoritária do mineral Espodumênio, seguido dos demais já supramencionados.

Tabela 1: Teor mineralógico pela razão dos picos encontrados no DRX.

Mineral	Amostra 1 (Teor)	Amostra 2 (Teor)	Amostra 3 (Teor)
Espodumênio	76%	33%	44%
Quartzo	7%	12%	1%
Pirita	17%	18%	10%
Biotita	-	9%	13%
Petalita	-	7%	11%

A caracterização tecnológica aqui utilizada possibilitou então confirmar que o minério ao qual a Companhia Brasileira de Lítio (CBL) está trabalhando no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais se trata de um Espodumênio com ocorrências em menor teor de outro aluminossilicato de lítio, a Petalita [14]. O espodumênio é um mineral de lítio que ocorre nos pegmatitos quase sempre associado a outros minerais como o Quartzo e Feldspatos como a Albita [15]. A presença de xistos de Biotita em análises dos pegmatitos de Araçuaí já havia sido elucidada no trabalho de Chaves e Dias (2022).

O espodumênio possui densidade 3,2 g/cm³ enquanto quartzo, feldspato e petalita têm densidades na faixa de 2,4 a 2,6 g/cm³ [16]. O concentrado da CBL é obtido pela separação em meio denso, portanto minerais que não possuem densidade próxima à do espodumênio não são efetivamente separados por este processo, isto sem usar muita energia ou um meio poluente. As mineradoras de lítio tem o compromisso ambiental de utilizar meios limpos, onde a pirita encontrada pode ser um agravante na mineração existente, visto que a oxidação úmida da Pirita pode gerar uma drenagem ácida, preocupação ambiental desafiadora das atividades de mineração [17].

4 CONCLUSÃO

A aplicação de uma caracterização como a descrita aqui possibilita a otimização do uso do recurso natural, resultando em maior confiabilidade, aumento de produtividade e ganhos econômicos em todas as fases, desde a mineração inicial até a transformação do bem produtivo. Este estudo concentrou-se na caracterização mineralógica de pegmatitos litiníferos da região do Vale do Jequitinhonha do estado de Minas Gerais, visando expandir o conhecimento sobre as propriedades desse recurso mineral, especialmente devido ao crescente interesse em minerais de lítio.

Os objetivos específicos foram alcançados ao identificar e quantificar as fases minerais presentes no minério de lítio e a faixa granulométrica após passagem na britagem primária. O minério de lítio proveniente da CBL destacou-se pela predominância de ganga feldspática e quartzo, além da presença de sulfetos de ferro. O teor significativo de pirita (Fe_2S) pode ser mitigado por meio da implementação de processos como a separação gravitacional, que separa minerais com base em sua densidade ou a moagem fina, onde a granulometria diferenciada da pirita em relação aos minerais de valor permite a separação por métodos mecânicos. A granulometria fina apresentada nas análises realizadas, também remonta ao potencial para o desenvolvimento da flotação. O aprimoramento desses métodos produzem efeitos sobre os ganhos econômicos, bem como no meio ambiente com uma possível utilização de menos rejeitos e processos sem uso de muita energia ou um meio poluente. Novos trabalhos serão considerados a fim de estudar as possibilidades de otimização do beneficiamento do minério de lítio da região de Araçuaí/MG.

REFERÊNCIAS

Rodrigues BS, Padula R. Geopolítica Do Lítio No Século Xxi. AUSTRAL Brazilian J Strateg Int Relations 2017;6:197–220. <https://doi.org/10.22456/2238-6912.66687>.

Chaves ML de SC, Dias CH. Lítio em Minas Gerais. Terrae Didat 2022;18:e022040. <https://doi.org/10.20396/td.v18i00.8671078>.

Moreira MAM, Silva CA da. Superintendência do Departamento Nacional de Produção Mineral no Ceará – Brasil. Estud Geológicos 2017;27:171–82.

Jeppson DW, Ballif JL, Yuan WW, Chou B e. Lithium Literature Review: Lithium’S Properties and Interactions. Hanford Eng Dev Lab 1978:1–111.

Grasso ML, González JA, Gennari FC. Lithium extraction from β -LiAlSi₂O₆ using Na₂CO₃ through thermal reaction. Miner Eng 2022;176. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107349>.

Zhu G, Cao Y, Wang Y, Wang X, Miller JD, Lu D, et al. Surface chemistry features of spodumene with isomorphous substitution. Miner Eng 2020;146:106139. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106139>.

Rio TK. O papel do lítio na viagem de Scholz à América do Sul. Dtsch Welle 2023:1–7.

Salomão PEA, Borges EAG. Extração de Lítio nos municípios de Itinga e Araçuaí no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais. Res Soc Dev 2020;9:54–75. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1798>.

Ferreira R, Chaves A, Scholz R, Gonçalves G. Petrogênese e idade química U-Th-Pb dos pegmatitos de Itambé (BA) registradas pela monazita. Geochim Bras 2020;34:59–71. <https://doi.org/10.21715/gb2358-2812.2020341059>.

Romeiro JCP, Pedrosa-Soares AC. Controle do minério de espodumênio em pegmatitos da mina da cachoeira, Araçuaí, MG. Geonomos 2005;13:75–81.

Mateus AM. Recursos naturais de lítio. Rev Ciência Elem 2020;8:1–37. <https://doi.org/10.24927/rce2020.034>.

Braga P, França S, Santos R. Panorama da indústria de lítio no brasil. II Simp Minerais Ind Do Nord 2013:237–47.

Viana, P.R.M.; Araujo, A.C.; Peres, A.E.C.; Salum MJG. Concentração de silicato de Lítio - uma revisão. XX ENTMME (Encontro Nac Trat Minérios e Metal Extrativa) 2004;4:325–32.

Charoy B, Noronha F, Lima A. Spodumene - petalite - eucryptite: Mutual relationships and pattern of alteration in Li-rich aplite-pegmatite dykes from Northern Portugal. Can Mineral 2001;39:729–46. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.39.3.729>.

Profile SEE. Um Minério De Espodumênio Zeta Potential Studies of the Main Minerals of a 2018.

Tímon Christian Vargas, França SCA, Braga PFA. Beneficiamento De Minério De Espodumênio Para Produção De Compostos De Lítio. CETEM 2012.

Koohestani B, Darban AK, Mokhtari P, Darezereshki E, Yilmaz E, Yilmaz E. Influence of Hydrofluoric Acid Leaching and Roasting on Mineralogical Phase Transformation of Pyrite in Sulfidic Mine Tailings. Minerals 2020;10:513. <https://doi.org/10.3390/min10060513>.