



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CALCINAÇÃO DE
 α -ESPODUMÊNIO VISANDO À EXTRAÇÃO DE LÍTIO: UMA
REVISÃO DA LITERATURA”**

Hedpo Vinicius Gonçalves

Ouro Preto, dezembro de 2023

HEDPO VINICIUS GONÇALVES

**“ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE CALCINAÇÃO DE
 α -ESPODUMÊNIO VISANDO À EXTRAÇÃO DE LÍTIO: UMA
REVISÃO DA LITERATURA”**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Versiane Albis Leão

Coorientador: Me. Rodrigo Ferreira Gomes

Ouro Preto, dezembro de 2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Hedpo Vinícius Gonçalves

Estudo das condições de calcinação de α -espodumênio visando à extração de lítio: uma revisão da literatura

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista.

Aprovada em 19 de dezembro de 2023

Membros da banca

Dr. Versiane Albis Leão - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Rodrigo Ferreira Gomes - Co-orientador - Redemat/UFOP
Dr. Victor de Andrade Alvarenga Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Matheus Mello Pereira - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Versiane Albis Leão, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/12/2023



Documento assinado eletronicamente por **Versiane Albis Leao, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/01/2024, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0642253** e o código CRC **DE87A6A7**.

RESUMO

O lítio, sendo o metal menos denso da tabela periódica e com reduzido potencial eletroquímico, torna-se um material atrativo para uma nova geração de baterias recarregáveis, dentre outras aplicações. Devido a isso, torna-se necessário o estudo dos métodos de obtenção de lítio, principalmente a partir do mineral espodumênio, o qual é de grande ocorrência em granitos pegmatíticos. No entanto, o mineral espodumênio é um inossilicato pouco reativo e muito resistente a ataques químicos, cujas reservas minerais encontram-se situadas nas regiões nordeste e sudeste do Brasil. Sendo assim, o concentrado deste mineral precisa ser submetido a uma etapa específica de tratamento térmico em fornos calcinadores, para que seja realizada a conversão do espodumênio e, em seguida, a extração do lítio. No presente trabalho, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de obter informações acerca da etapa de calcinação de espodumênio e determinar, por meio da análise crítica dos resultados apresentados em artigos científicos, quais as melhores condições de: (i) tempo, (ii) temperatura e (iii) granulometria a serem observadas experimentalmente visando a análise da etapa de calcinação do α -espodumênio. Para isso, o presente trabalho foi fundamentado nos conceitos de revisão sistemática, sendo a primeira etapa a identificação do tema a ser pesquisado, as palavras-chaves associadas ao mesmo, seguidas da busca e da seleção dos estudos mais significativos. Por fim, a etapa de análise foi realizada com o intuito de tirar conclusões a partir da leitura dos trabalhos. Dessa maneira, o presente trabalho revisou o panorama da etapa de calcinação. Foi possível concluir que o espodumênio tem sua transformação de fase aplicando-se as seguintes condições: tempos de 10min a 240min, temperaturas de 950°C a 1.200°C e granulometria da amostra de 10 μ m a 4.000 μ m.

Palavras-chave: Espodumênio; Pirometalurgia; Lítio; Transformações mineralógicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Etapas da revisão sistemática.....	8
Figura 4.1 - Participação econômica das principais aplicações do lítio em 2002	12
Figura 4.2 - Fluxograma básico do processo alcalino de obtenção do hidróxido de lítio.....	17
Figura 4.3 - Fluxograma básico do processo ácido de obtenção do carbonato de lítio	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resultados da busca nos bancos de dados.....	10
Tabela 4.1 - Produção de lítio por países entre os anos de 2012 e 2014.....	13
Tabela 4.2 - Principais salmouras de lítio e suas composições químicas (%).....	14
Tabela 4.3 - Principais minerais economicamente relevantes que contém lítio.	14
Tabela 4.4 - Levantamento bibliográfico de estudos que investigaram a etapa de calcinação de α -espodumênio.....	20

LISTA DE SIGLAS

CBL - Companhia Brasileira de Lítio

RFP – Relatório Final de Pesquisa

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo Geral.....	7
2.2 Objetivos Específicos	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS	8
3.1 Identificação.....	8
3.2 Busca e Seleção	10
3.3 Análise.....	9
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
4.1 Lítio.....	10
4.1.1 Aplicações	11
4.1.2 Mercado do lítio	12
4.1.3 Fonte	13
4.2 Espodumênio.....	15
4.3 Principais rotas de produção de lítio	16
4.4 Calcinação do α-espodumênio.....	19
5 Conclusão.....	23
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	24

1 INTRODUÇÃO

O lítio, sendo o metal menos denso da tabela periódica e com reduzido potencial eletroquímico, tornou-se uma matéria-prima atrativa para uma nova geração de baterias recarregáveis para uso em dispositivos eletrônicos e carros elétricos. Com a crescente demanda pelo lítio, pesquisas visando aumentar a eficiência da produção do lítio e reduzir os danos ao meio ambiente se tornam indispensáveis, uma vez que a utilização deste metal é por vezes limitada ao seu elevado preço (VIKSTROM *et al.*, 2013).

As principais fontes minerais de lítio são os minerais espodumênio, lepidolita, amblygonita e talita, sendo estes aluminossilicatos de lítio. Além disso, os evaporitos (salmouras com alto teor de lítio) também são uma importante fonte de lítio, sendo encontrados em regiões desérticas perto de vulcões, nas quais a taxa de evaporação é maior que a pluviométrica, gerando um enriquecimento de elementos como o lítio (BRAGA e SAMPAIO, 2008).

Dentre os minerais de lítio, o espodumênio se destaca, não só pela alta concentração de lítio (8,0% em peso de Li_2O), mas também pela ocorrência desse mineral no Brasil, em especial nos estados de Minas Gerais, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte (NAVARRO *et al.*, 2017). O espodumênio pode existir em formas polimórficas, porém a fase que ocorre na natureza é o α -espodumênio, formado a baixas temperaturas e pertencente ao sistema monoclinico. Em altas temperaturas, o α -espodumênio é convertido em β -espodumênio, sendo este cristalizado no sistema tetragonal. O terceiro e último polimorfo existente possui sistema hexagonal e é formado a altas temperaturas a partir de uma mistura de espodumênio com quartzo, conhecido como γ -espodumênio (PELTOSAARI *et al.*, 2015).

Diversas técnicas metalúrgicas vêm sendo pesquisadas visando à obtenção do lítio presente em minerais por rotas alcalinas ou ácidas. No que se refere à obtenção do lítio a partir do espodumênio, a rota clássica consiste em uma etapa na qual o concentrado desse mineral é submetido ao processo de calcinação, visando alterar a estrutura cristalina do espodumênio, aplicando-se temperaturas na faixa de 950°C a 1.100°C para conversão do α -espodumênio em β -espodumênio, de maior reatividade (MEDINA e EL-NAGGAR, 1984). No presente trabalho, será feita uma revisão da literatura sobre o processo de calcinação variando parâmetros como o tempo, granulometria e a temperatura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática acerca da etapa de calcinação de α -espodumênio como parte da rota ácida de obtenção do carbonato lítio.

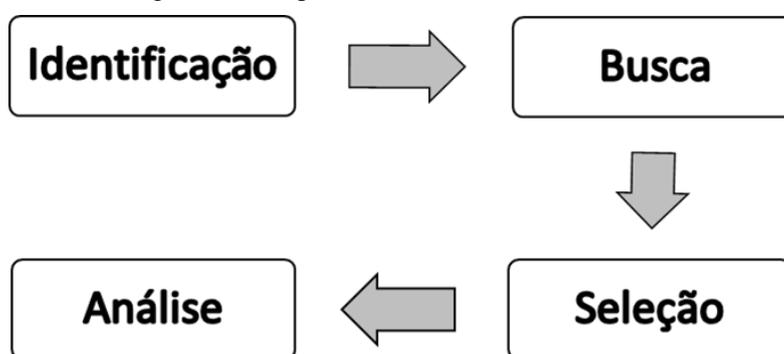
2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o estado da arte relacionado à etapa de calcinação de espodumênio;
- Determinar, por meio da análise crítica dos resultados publicados em artigos científicos qual a faixa de trabalho de: (i) tempo, (ii) temperatura e (iii) granulometria a serem observadas experimentalmente visando a melhor faixa da etapa de calcinação do α -espodumênio.
- Estudar a influência dos parâmetros tempo, temperatura e granulometria sobre o processo de calcinação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão da literatura realizada no presente trabalho foi fundamentada nos conceitos de revisão sistemática. Sendo assim, a primeira etapa foi a identificação precisa do tema pesquisado, seguida da busca efetiva pelos trabalhos científicos e da seleção dos estudos mais significativos (CORDEIRO *et al.*, 2007). Por fim, a etapa de análise foi realizada com o intuito de sistematizar o conhecimento a partir da leitura dos trabalhos. A Figura 3.1 ilustra as etapas da revisão sistemática.

Figura 3.1 - Etapas da revisão sistemática.



3.1 Identificação

A primeira etapa da investigação científica foi a definição de uma pergunta norteadora, assim como das palavras-chave a serem pesquisadas nas bases acadêmicas. A pergunta norteadora foi: Em quais condições experimentais de temperatura, tempo e granulometria é realizada a etapa de calcinação de α -espodumênio visando a transformação de fase para β -espodumênio?

A partir da pergunta norteadora, foi possível definir também quais seriam as palavras-chave a serem pesquisadas nas bases de dados, sendo essas: *spodumene*; *calcination and transformation*. Vale ressaltar que as bases acadêmicas utilizadas foram: Google Scholar, ScienceDirect, Scopus.

3.2 Análise

Após as etapas de identificação, busca e seleção, os artigos foram finalmente lidos e analisados no que se refere à metodologia e aos resultados empregados pelos autores no processo de calcinação do α -espodumênio em β -espodumênio. Foi dada particular importância às variáveis tempo, temperatura e granulometria empregadas nos estudos, uma vez que tais variáveis são, em geral, as mais relevantes no processo de calcinação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção do trabalho, foram abordados temas que vão desde uma observação geral sobre o lítio e suas características até as fontes, os principais depósitos brasileiros, o mercado e algumas aplicações deste metal. Além disso, foi discutida a utilização do espodumênio como fonte de lítio e enfatizada a etapa de calcinação deste mineral, como parte da rota ácida para a obtenção de um dos produtos que é o carbonato de lítio. Com isso, esta revisão bibliográfica reuniu informações importantes a respeito da transformação da fase α -espodumênio para β -espodumênio na etapa de calcinação e determinou as condições de variáveis: tempo, temperatura e granulometria durante essa etapa.

4.1 Busca e Seleção

Por meio das buscas realizadas nas bases acadêmicas com as palavras-chave escolhidas, foi possível encontrar 1.514 trabalhos acadêmicos (Tabela 3.1). Após a busca pelas palavras-chave, o grande número de trabalhos encontrados precisou ser reduzido para que fosse possível a leitura e interpretação dos mesmos. Para isso, os estudos mais relevantes foram selecionados por meio da filtragem por relevância em cada uma das plataformas. Além disso, os títulos e resumos dos artigos eram lidos, quando necessário, para que fosse avaliada a adequação do trabalho ao tema. Ao final da seleção dos estudos foram analisados sete (07) trabalhos.

Tabela 3.1: Resultados da busca nos bancos de dados.

Base de pesquisa	Palavras-chave	Número de artigos encontrados
ScienceDirect	<i>spodumene;</i> <i>calcination and</i> <i>transformation</i>	164
Google Scholar		1.200
Scopus		150

4.2 Lítio

O lítio é o metal menos denso ($0,534\text{g cm}^{-3}$) e eletropositivo ($E^0 = -3,05\text{V}$) da tabela periódica (ATKINS, JONES e LORETTA, 2018). Além disso, o lítio tem brilho prateado, podendo encontrado principalmente em rochas magmáticas, nas quais não ocorre na forma livre

e mesmo combinado está longe de ser abundante, sendo-lhe atribuída uma concentração na crosta terrestre da ordem de 0,004% em peso (BRAGA e SAMPAIO, 2012).

4.2.1 Aplicações

Os principais usos do lítio incluem aplicações químicas, tais como a utilização de sais de lítio, como carbonato de lítio, brometo de lítio, cloreto de lítio e hidróxido de lítio em baterias, fármacos, lubrificantes e no tratamento de ar. Além destas, têm-se as aplicações técnicas, quando o concentrado mineral portador de lítio (espodumênio ou petalita) é empregado diretamente na indústria de vidros e cerâmicas (BRAGA e SAMPAIO, 2013).

A primeira aplicação industrial do lítio foi como aditivo em graxas lubrificantes para motores de aeronaves, durante a segunda guerra mundial. A aplicação do lítio como aditivo em graxas promove um aumento do ponto de fusão, aliado a uma menor abrasividade, quando comparado às graxas a base de cálcio, anteriormente empregadas (LANDOLT, 1957; MAUTHNER, 2011). Outro uso do lítio é na indústria farmacêutica, onde os sais de lítio são utilizados para o tratamento de pacientes que possuem transtorno bipolar ou como antidepressivo, devido aos seus efeitos reguladores de humor (ROSA *et al.* 2006).

Os minerais portadores de lítio pedalita e/ou espodumênio também possuem aplicação como aditivos em cerâmicas, devido à alta resistência ao choque térmico e à baixa expansão térmica. De maneira geral, estes minerais de lítio melhoram a durabilidade de cerâmicas refratárias submetidas a ciclos de aquecimento e resfriamento rápidos em fornos (REBOUÇAS, 2017). Vale ressaltar que o lítio metálico ou na forma de hidreto possui aplicações militares como propelente de foguetes ou como combustível sólido (NOVAIS, 2021).

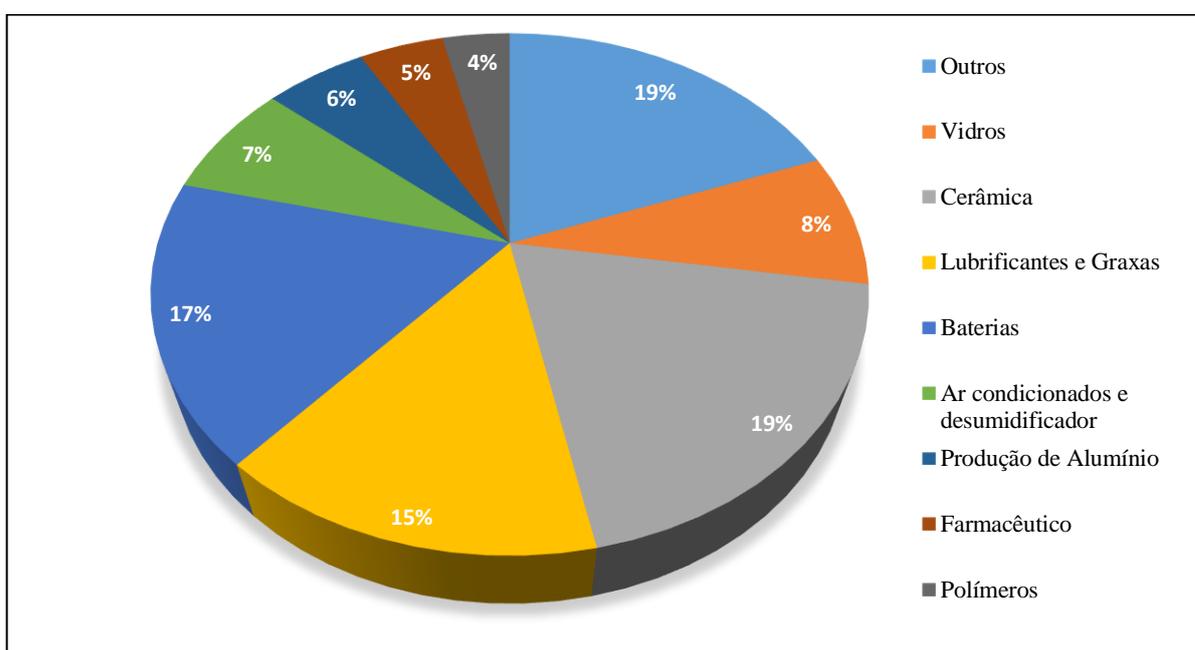
A aplicação do lítio em baterias de carros elétricos vem chamando atenção nos últimos anos devido à ascensão dos veículos elétricos em detrimento daqueles que utilizam motores a combustão. As baterias de íons de lítio são utilizadas em carros elétricos por possuírem alta densidade de energia, aliada a longos ciclos de vida, baixas taxas de autodescarga e boa segurança no manuseio. Também, pode ser projetado com materiais de baixa densidade, redução de massa e tamanho (BARCELOS, 2020).

A crescente demanda pela utilização das baterias de íons de lítio no Brasil pode ser constatada com a implementação do primeiro projeto de produção de baterias de lítio no mercado interno. A importância do desenvolvimento de projetos deste tipo está diretamente relacionada aos esforços internacionais do país nas emissões de (CO₂). Quando se trata de veículos elétricos, a substituição de grandes frotas de ônibus urbanos e outras alternativas de

mobilidade urbana são um dos primeiros segmentos a receber atenção significativa (VALE, 2021).

A Figura 4.1 apresenta as principais aplicações do lítio e a participação econômica de cada uma delas em porcentagem. É possível observar que a aplicação em cerâmicas tinhamem a maior participação econômica (19%), seguida da aplicação em baterias (17%), em graxas e lubrificantes (15%) e em vidros (8%). Vale ressaltar que os dados apresentados na Figura 4.1, obtidos por Ebensperger, Maxwell e Moscoso (2005), são referentes ao ano de 2002.

Figura 4.1 – Participação econômica das principais aplicações do lítio em 2002.



Fonte: Adaptado de Ebensperger, Maxwell e Moscoso (2005).

4.2.2 Mercado do lítio

Com o aumento da utilização de baterias de íons de lítio no mundo, é esperado um crescimento tanto da demanda quanto da oferta mundial do lítio e de seus compostos. A Tabela 4.1 mostra a quantidade de lítio em toneladas ofertada pelos principais países produtores. O Chile é o maior produtor de lítio do mundo em 2014 e foi responsável por 44% da produção mundial, com cerca de 11.000t. Além disso, Austrália e Argentina também possuem produções relevantes, superiores a 10% da produção mundial, seguidas por China, Estados Unidos da América (EUA), Zimbábue, Portugal e Brasil (BROWN *et al.* 2016).

O hidróxido de lítio (LiOH) e o carbonato de lítio (Li₂CO₃) são as principais formas em que o lítio é comercializado e utilizado industrialmente. O carbonato de lítio, por sua vez, é o

produto mais popular no mercado de transações do lítio e seu consumo correspondia em 2014 à metade do consumo global de lítio, ou seja, cerca de 13.000t, como mostrado na Tabela 4.1. Com relação ao hidróxido de lítio, utilizado principalmente na indústria de lubrificantes, seu consumo representava cerca de 20% do consumo mundial de lítio (DEUTSCHE BANK, 2016; GARCIA, 2016).

Tabela 4.1 – Produção de lítio por países entre os anos de 2012 e 2014.

País	2012		2013		2014	
	Li (toneladas)	% no mundo	Li (toneladas)	% no mundo	Li (toneladas)	% no mundo
Chile	13.200	48	11.200	47	11.500	44
Australia	8.400	30	6.800	28	8.300	32
Argentina	2.400	9	2.300	10	2.800	11
China	1.200	4	1.200	5	1.200	5
EUA	1.000	4	870	4	900	3
Zimbabwe	900	3	900	4	900	3
Portugal	300	1	300	1	300	1
Brasil	200	1	200	1	200	1
Total	27.800		23.800		26.100	

Fonte: Adaptado de Brown *et al.* (2016).

4.2.3 Principais reservas de lítio

Os compostos de lítio podem ser obtidos a partir de diversas fontes, como minerais, tais como o espodumênio, lepidolita, ambligonita e petalita, ou dos evaporitos, que são salmouras com alto teor de lítio (BRAGA e SAMPAIO, 2008). Os evaporitos são encontrados em regiões desérticas perto de vulcões, nas quais a taxa de evaporação é maior que a pluviométrica, gerando um enriquecimento de elementos como o lítio. Além do lítio, os principais evaporitos do mundo possuem em sua composição magnésio, potássio e sódio (BRAGA e SAMPAIO, 2008). A concentração desses constituintes em alguns depósitos comerciais está apresentada na Tabela 4.1, por meio da qual é possível concluir que os depósitos com maior concentração de lítio estão localizados no Chile.

Além dos evaporitos, o lítio pode ser encontrado em mais de 150 minerais, no entanto apenas quatro (04) são considerados de fato minerais de lítio. De acordo com Harben (2002),

os minerais considerados fontes economicamente viáveis para a extração de lítio são: espodumênio, lepidolita, petalita e ambliogonita. A Tabela 4.2 mostra a fórmula química dos principais minerais de lítio, assim como o teor médio de lítio presente de cada um deles. É possível observar que os teores observados vão de aproximadamente 1,4% até 4,7%.

Tabela 4.2 - Principais salmouras de lítio e suas composições químicas (%)

Salmouras de Lítio	Li (% em peso)	Mg (% em peso)	Na (% em peso)
Salar do Atacama, Chile	0,15	0,96	7,60
Salar de Uyuni, Bolívia	0,03	0,54	9,10
Salar do Homem morto, Argentina	0,06	0,07	9,50
Pico de prata, NV, EUA	0,02	0,03	7,50
Grande lago salgado, UT, EUA	0,01	0,80	7,00
Mar morto, Israel/Jordânia	0,00	4,00	3,00
Água do mar	0,00	0,13	1,80

Fonte: Adaptado de Roskill, (2002).

Vale ressaltar que o teor de lítio encontrados no mineral espodumênio é de 3,7%, valor superior aos verificados nos minerais petalita e lepidolita. Detalhes relacionados ao mineral espodumênio serão discutidos no tópico 4.2, uma vez que esse mineral desperta particular interesse por ser o principal constituinte encontrado em grande parte das reservas brasileiras de lítio (BRAGA E SAMPAIO 2008).

Tabela 4.3 - Principais minerais economicamente relevantes que contém lítio.

Nome	Fórmula Química	Teor de Lítio (% em peso)
Espodumênio	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3,7
Lepidolita	$\text{K}_2(\text{Li,Al})_{5-6} \{ \text{Si}_{6-7}\text{Al}_{2-10}\text{O}_{20}(\text{OH,F})_4$	1,39 - 3,6
Petalita	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	1,6 - 2,27
Ambliogonita	$\text{LiAl}[\text{PO}_4][\text{F,OH}]$	3,4 - 4,7

Fonte: Adaptado de Brown *et al.* (2016).

De acordo com Roskill (2009), os teores de lítio encontrados nas reservas brasileira são de aproximadamente 1,92%, valor superior aos observados em reservas de outros países, como

por exemplo, 1,36% de Li na Austrália, 1,35% no Zimbábue, 1,28% no Canadá, 0,67% nos Estados Unidos da América (EUA). No Brasil, são encontradas reservas de lítio no Vale do Jequitinhonha, situado em Minas Gerais e nos estados do Rio de Janeiro, Bahia e Espírito Santo. Sendo assim, a maior reserva de que se tem estudo de viabilidade está localizada no estado de Minas Gerais e é essencialmente composta por espodumênio (MENDES, 2009).

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2016), as reservas de lítio aumentaram aproximadamente 12,5% no ano de 2015. Com esse aumento das reservas brasileiras, de acordo com Paes (2017) a participação do Brasil nas reservas globais passou de 0,5% para 8%.

4.3 Espodumênio

O espodumênio, é um silicato de alumínio (Tabela 4.2) composto por 8,0% Li_2O , 27,4% de Al_2O_3 , e 64,6% de SiO_2 . É comumente encontrado em granitos pegmatíticos (formados essencialmente por quartzo, feldspato, plagioclásio e micas) ricos em lítio, ou em granitos, sendo que nos pegmatitos pode ocorrer sob a forma de grandes cristais de até noventa toneladas (LONDON, 2018).

O mineral espodumênio pode existir em formas polimórficas diversas. A fase que ocorre na natureza é o α -espodumênio, formado em baixas temperaturas e que pertence ao sistema cristalino monoclinico. Apenas sob altas temperaturas, o α -espodumênio é convertido em β -espodumênio, sendo este cristalizado do sistema monoclinico ao tetragonal. O terceiro estado polimorfo é uma fase metaestável resultante do aquecimento do α -espodumênio, que é transformado em γ -espodumênio com a estrutura hexagonal (PELTOSAARI *et.al.*, 2015).

Uma vez que o espodumênio é um aluminossilicato pouco reativo e muito resistente a ataques químicos, o processamento metalúrgico deste mineral requer uma etapa específica de tratamento térmico em fornos calcinadores para que seja realizada a conversão do α -espodumênio em β -espodumênio, um produto mais reativo. A maior reatividade observada do β -espodumênio pode ser explicada em decorrência da expansão estrutural do mineral, promovida pelo aquecimento, tornando-o mais acessível aos reagentes químicos (EVANS, 2016).

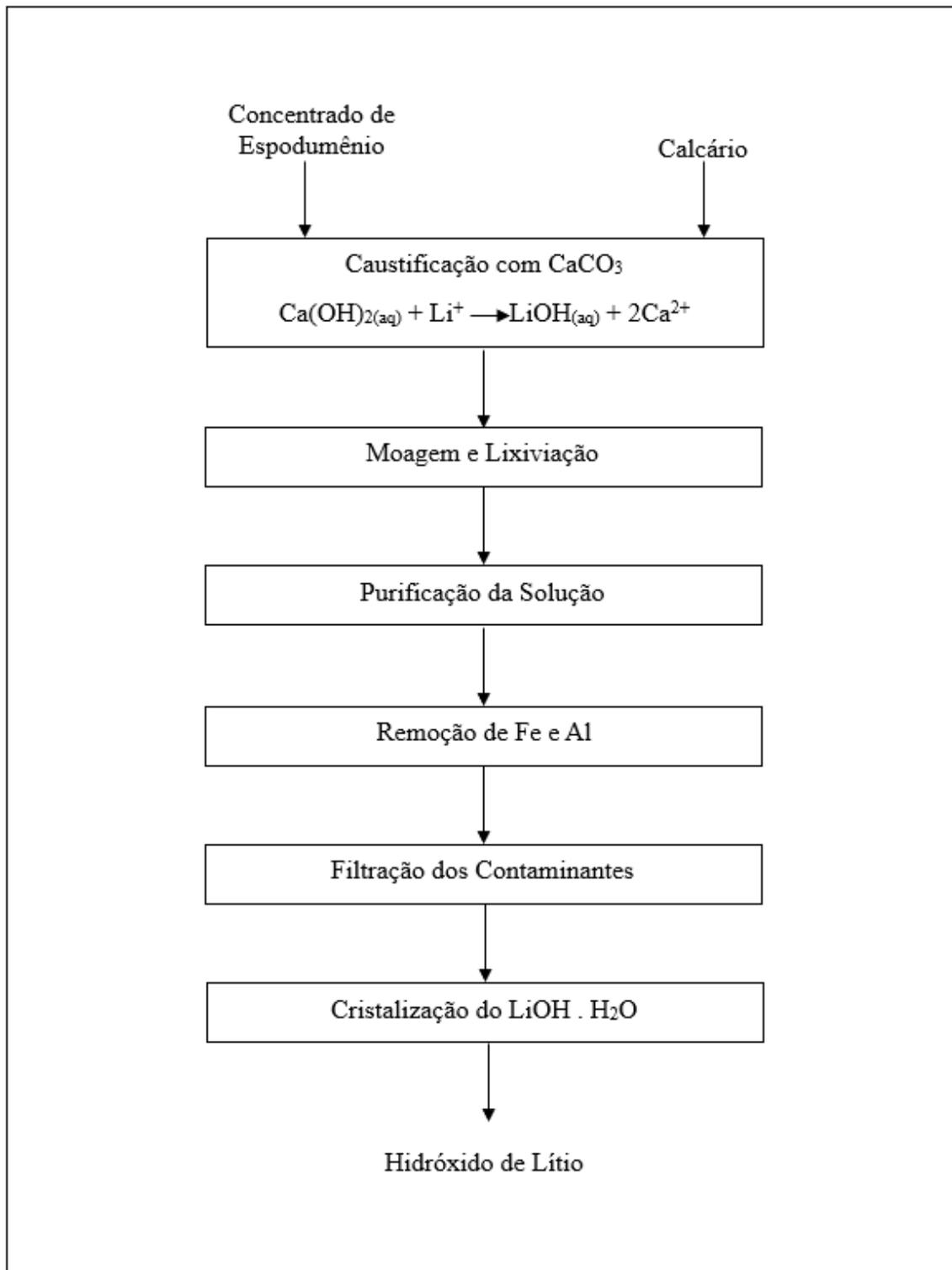
De acordo com Peretyazhko e Savina (2010), a faixa de temperatura para a conversão fase $\alpha \rightarrow$ fase β -espodumênio é bastante estreita entre 920°C à 1.050°C e depende das condições de calcinação, presença de impurezas no mineral e alguns outros fatores. De maneira similar,

Selakjani (2016) realizou estudos sobre o efeito do tempo e da temperatura de calcinação de concentrados de espodumênio, aquecidos entre 800°C e 900°C, para diferentes tempos de residência no forno e concluiu que estas temperaturas não levaram a mudanças de fase significativas. Com isso, para que a transformação de α -espodumênio em γ e β -espodumênio possa ser evidenciada, há a necessidade que as amostras de espodumênio sejam aquecidas até temperaturas superiores a 950°C, por 30min ou mais.

4.4 Principais rotas de produção de lítio

Embora existam diversas tecnologias emergentes para a extração de lítio do espodumênio e de outros minerais, as rotas tradicionais de produção de compostos de lítio são a rota ácida e a alcalina. A primeira rota desenvolvida para a produção do hidróxido de lítio foi a rota alcalina, na qual o concentrado de espodumênio é calcinado com cal hidratada ou calcário e o produto formado é lixiviado em água, filtrado e, em seguida, cristalizado como hidróxido de lítio monohidratado. A Figura 4.2 apresenta o fluxograma básico do processo alcalino.

Figura 4.2 - Fluxograma básico do processo alcalino de obtenção do hidróxido de lítio.

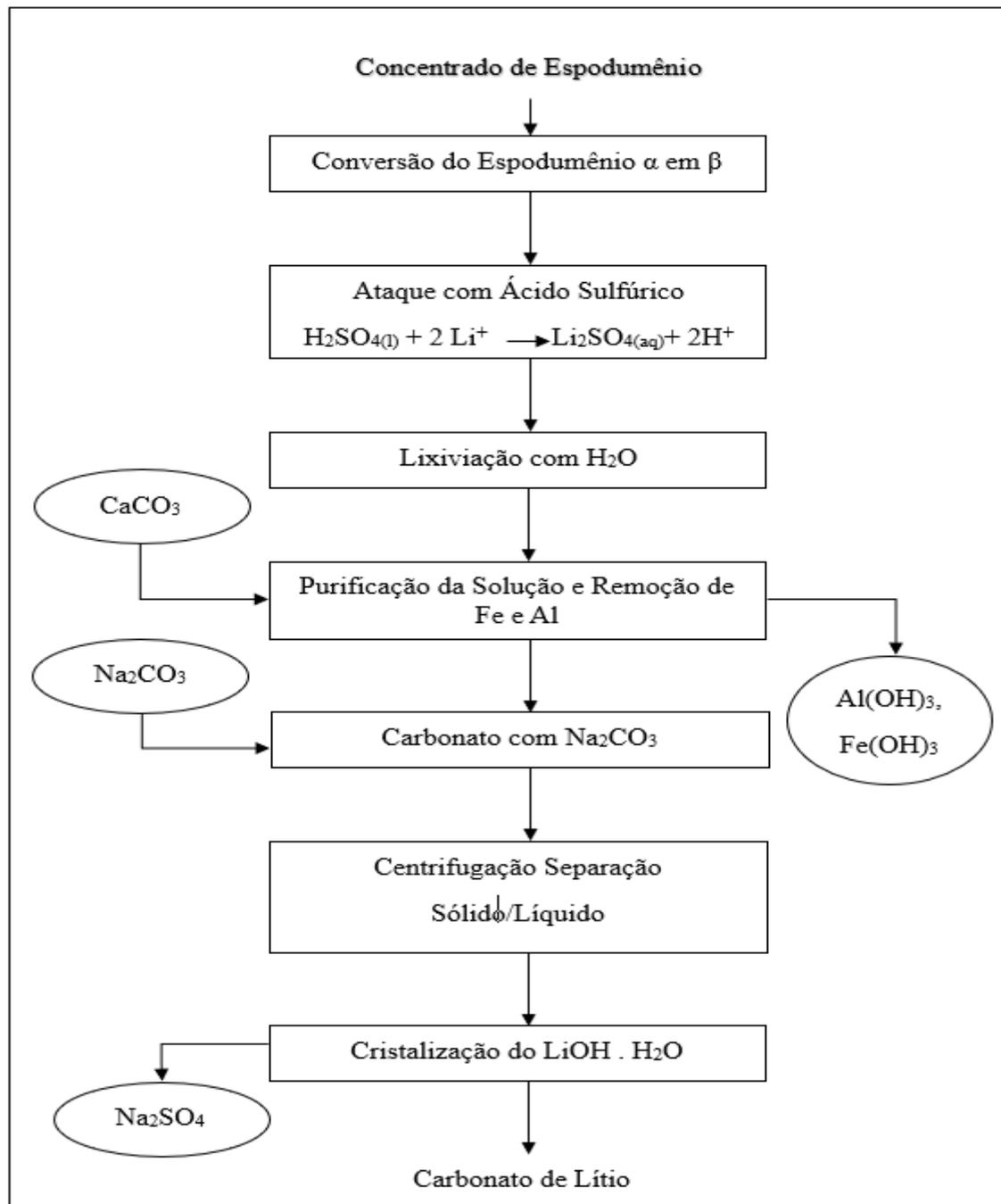


Fonte: Adaptado Braga e Sampaio (2008).

Na rota ácida (Figura 4.3), utilizada no Brasil, o concentrado de espodumênio é calcinado, sulfatado com ácido sulfúrico e depois lixiviado em água. Logo em seguida à

lixiviação, a solução é purificada, filtrada e o lítio precipitado como carbonato de lítio (BRUNHARA e BRAGA, 2021).

Figura 4.3 - Fluxograma básico do processo ácido de obtenção do carbonato de lítio.



Fonte: Adaptado de Braga e Sampaio (2008).

4.5 Calcinação do α -espodumênio

Diversos trabalhos visaram estudar algumas etapas presentes nos fluxogramas industriais para a extração de lítio. Além disso, inúmeros estudos se dedicaram em desenvolver novos processos, com o intuito de substituir totalmente ou parcialmente as etapas presentes nos fluxogramas tradicionais de produção de lítio a partir de minerais silicatados. A seguir, são discutidos trabalhos que estudaram a etapa de calcinação do espodumênio, visando à extração de lítio.

No que se refere à etapa de calcinação para a conversão do α -espodumênio em β -espodumênio, diversos estudos se concentraram na análise do comportamento térmico do espodumênio. De acordo com Salakjani, Singh e Nikoloski (2016), em temperaturas inferiores a 950°C, há apenas pequenas alterações físicas, mas toda a amostra permanece como α -espodumênio. A partir dessa temperatura, o α -espodumênio começa a se converter em γ -espodumênio e em temperaturas mais altas, próximas a 1.100°C, ocorre a conversão completa para β -espodumênio, em apenas 10 minutos.

Os resultados apresentados por Fosu *et al.*, (2021) evidenciaram que em uma amostra de espodumênio com tamanho de partícula entre 10 μ m e 200 μ m, a transformação completa para a fase β -espodumênio foi alcançada a 975°C e 1.000°C, após tratamento térmicos durante 240min e 60min, respectivamente. Já no trabalho de Tian (2011), os ensaios de calcinação mostraram que a conversão do α -espodumênio em β -espodumênio pode ser realizada em menor tempo (30min), desde que a temperatura seja aumentada para aproximadamente 1.050°C.

Além disso, Tian (2011) estudou a influência da granulometria das partículas na etapa de calcinação e concluiu que amostras de espodumênio com tamanho médio de aproximadamente 3mm apresentaram transferência de calor inadequada e por esse motivo não são apropriadas para serem calcinados diretamente no aparato experimental em que o autor trabalhou. De acordo com Abdullah *et al.*, (2019), o tamanho de partícula influencia na formação das fases e quanto menor a granulometria da amostra, maior a formação de γ -espodumênio formada. Além disso, os autores mostraram que taxas de aquecimento inicial rápidas tem efeito contrário e atrasam a formação de γ -espodumênio a temperaturas mais altas, provavelmente resultantes de efeitos cinéticos associados à nucleação na nova fase.

A Tabela 4.4 apresenta um levantamento bibliográfico de estudos que investigaram a etapa de calcinação de α -espodumênio e evidencia os tempos de calcinação empregados nos estudos, assim como as temperaturas utilizadas e a granulometria média das amostras de

espodumênio submetidas à calcinação. A temperatura máxima observada nos estudos foi de 1.200°C e a mínima 800°C, de acordo com os estudos avaliados, a temperatura mínima na qual ocorre a conversão do α -espodumênio em β -espodumênio é de 950°C.

No que se refere aos tempos de calcinação empregados nos trabalhos listados na Tabela 4.4, foi possível observar um grande intervalo de tempo, desde 10min até 240min. Dessa maneira, o tempo de calcinação parece ser uma variável importante a ser estudada, uma vez que o levantamento bibliográfico realizado evidencia a possibilidade de utilização de diversos tempos. De maneira análoga, os trabalhos descritos na tabela empregaram tamanhos de partículas diversos nem seus estudos. A menor granulometrias observada foi 10 μ m, mais de duas ordens de grandeza menor que o maior tamanho médio de partículas utilizado (4mm).

Diante do exposto, tanto o tempo quanto o tamanho das partículas encaminhadas à etapa de calcinação podem ser fatores importante e devem ser considerados em estudos que objetivarem a otimização da etapa de calcinação do mineral espodumênio.

Tabela 4.4 – Levantamento bibliográfico de estudos que investigam a etapa de calcinação de α -espodumênio

Diâmetro médio das partículas	Temperatura de transformação α em β	Tempo	Referência
10 μ m a 200 μ m	~975°C e ~1000°C	240min e 60 min	(FOSU <i>et al.</i> , 2021)
0mm a 3mm	~1.050°C	30min	(TIAN, 2011)
45 μ m	~1.050°C	30min	(ROSALES <i>et al.</i> , 2019)
325 μ m	800°C a 1.100°C	10min a 60min	(SALAKJANI, SINGH e NIKOLOSKI, 2016)
2mm a 4mm	~1.100°C	15min	(PELTOSAARI <i>et al.</i> , 2015)
50 μ m	~1.200°C	120min	(BARBOSA <i>et al.</i> , 2014)
20 μ m e 120 μ m	950°C a 1.050°C		(ABDULLAH <i>et al.</i> , 2019)

Diferente dos trabalhos citados anteriormente, que estudaram a etapa de calcinação por meio de aquecimento convencional, Peltosaari *et al.*, (2015) avaliaram as transformações de fase do espodumênio em fornos de micro-ondas, variando o tamanho de partícula entre 2mm e 4mm. As amostras aquecidas em forno micro-ondas foram convertidas completamente em β -espodumênio quando mantidas a 1.100°C durante 3min, enquanto aplicando o aquecimento convencional, o tempo necessário para que fosse atingida a mesma conversão foi de 10min. Dessa maneira, os autores concluíram que o aquecimento em fornos micro-ondas pode ser vantajoso quando comparado ao aquecimento convencional, principalmente quando o objetivo é diminuir o tempo da etapa de calcinação.

A inclusão de uma etapa de pré-tratamento da amostra, anterior à calcinação, foi estudada por Kotsupalo *et al.*, (2010), com o objetivo de aumentar a reatividade do espodumênio e alcançar a conversão total em β -espodumênio em condições menos agressivas de temperatura e tempo. A técnica estudada pelos autores, denominada ativação mecânica, foi realizada com o auxílio de um moinho planetário e proporcionou a mudança estrutural na rede cristalina do α -espodumênio, resultando em um aumento de 100 vezes na área superficial da amostra. Com isso, os autores concluíram que o emprego da etapa de ativação mecânica pode ser aplicado com o intuito de aumentar a eficiência de extração tanto de lítio quanto de alumínio presentes no mineral espodumênio.

O estudo realizado por Dessemond *et al.*, (2020), teve como objetivo avaliar a eficiência da extração de lítio presente em espodumênio sem a realização das etapas de moagem e flotação. Com isso, o trabalho realizou o tratamento térmico e a redução do tamanho das partículas do concentrado de espodumênio em uma única etapa, realizada em um forno rotativo a 1.050°C, por 30min. Com isso, o tamanho médio das partículas passou de 20mm para menos de 0,425mm. Foi demonstrada a possibilidade de se alcançar uma alta eficiência de extração de lítio, aproximadamente 98%, sem a necessidade das etapas de moagem e flotação antes da etapa de calcinação.

Alguns trabalhos encontrados na literatura se concentraram na mistura de alguns reagentes sólidos com o concentrado durante a etapa de calcinação. Como exemplo, Yan *et al.*, (2012) avaliaram a adição de K_2SO_4 , CaO e Na_2SO_4 durante a calcinação e os resultados mostraram que a eficiência de extração de lítio foi de aproximadamente 92%, alcançada aplicando a temperatura de 1.100°C e a proporção de 0,5:0,1:0,1 ($Na_2SO_4/K_2SO_4/CaO$), em que a temperatura de calcinação e a relação mássica dos reagentes afetam significativamente a eficiência da extração de lítio.

De maneira similar, Pinto (2019) analisou a adição de uma mistura de cloretos a um concentrado de espodumênio, durante a etapa de calcinação. De acordo com o autor, foi possível obter extrações superiores a 96% aplicando a relação mássica de 6:1 de (cloretos:espodumênio) e a relação molar 2:1 ($\text{MgCl}_2:\text{CaCl}_2$), para um tempo de 30min de calcinação na temperatura de 1.150°C.

Diante da análise crítica dos resultados publicados em artigos científicos foi possível determinar a faixa ótima de tempo (de 10min a 240min), temperatura (de 950°C a 1.200°C) e granulometria (de 10 μm a 4.000 μm), a serem testadas experimentalmente visando a otimização da etapa da calcinação de α -espodumênio. Além disso, a análise do estado da arte evidenciou algumas abordagens promissoras presentes na literatura, tais como a utilização de aquecimento por micro-ondas, a utilização de novas etapas de pré-tratamento e a mistura de reagentes sólidos ao concentrado de espodumênio.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho revisou o estado da arte relacionado à etapa de calcinação do mineral espodumênio, com o objetivo de extrair lítio. A etapa de calcinação presente no fluxograma básico do processo de obtenção do carbonato de lítio é realizada com o objetivo de promover a transformação de fase do α -espodumênio para o β -espodumênio. A temperatura máxima observada na literatura foi de 1.200°C e de acordo com os estudos analisados, a temperatura mínima na qual ocorre a conversão do α -espodumênio em β -espodumênio é de 950°C. No que se refere aos tempos de calcinação, foi possível observar o emprego de uma grande variedade de tempos, desde 10min até 240min. Além disso, os trabalhos revisados também empregaram tamanhos de partículas diversos, sendo a menor granulometria observada 10 μ m, cerca de duas ordens de grandeza menor que o maior tamanho médio de partículas utilizado (4mm).

Dessa maneira, tanto o tempo quanto o tamanho das partículas encaminhadas à etapa de calcinação podem ser fatores importantes e devem ser considerados em estudos que objetivarem a otimização da etapa de calcinação do mineral espodumênio. Além disso, a análise do estado da arte evidenciou algumas abordagens promissoras presentes na literatura, tais como a utilização de aquecimento por micro-ondas, a utilização de novas etapas de pré-tratamento e a mistura de reagentes sólidos ao concentrado de espodumênio.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABDULLAH, A. A., OSKIERSKI, H. C., ALTARAWNEH, M., SENANAYAKE, G., LUMPKIN, G., e DLUGOGORSKI, B. Z. Phase transformation mechanism of spodumene during its calcination. **Engenharia Mineral**, v. 140, p.140, 2019

ATKINS, P; JONES, L; LORETTA, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. (7^a.Ed.). Tradutor: Felix Nonnenmacher. Bookman Editora. p.1094. 2018

AZAROVA, Yu., KAZANTSEV, V., KOLTSOV, V., SARYCHEV, G., e TANANAEV, I. The Zavitsinskoye lithium-beryllium deposit dumps as raw material for lithium production. *Obogashchenie Rud.* p 42-46. 2015

BARBOSA, L. I., VALENTE, G., OROSCO, R.P., e GONZALEZ, J.A. Lithium extraction from β -spodumene through chlorination with chlorine gas. **Minerals Engineering**, v. 56, p. 29-34, 2014

BARCELOS, L. P. **Estudos sobre o reaproveitamento de baterias íon-lítio**. 125f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil. p 125. 2020

BIESEKI, L., MELO, V. R. M., V SOBRINHO, E., MELO, D. M. A., e PERGHER, S. B. C. Extração de lítio de amostras de β -espodumênio. **Cerâmica**, v. 59, p. 557-562. 2013

BOTTO, IRMA. L. Structural and spectroscopic properties of leached spodumene in the acid roast processing. **Materials Chemistry and Physics**, v. 13, n. 5, p. 423-436, 1985

BRAGA, P. F. A., FRANÇA, S. C. A. e CELINO, E. Lítio - **uma visão atualizada do mercado mundial**. In: Anais do XXV ENTMMME/VIII MSHMT, Goiânia, 2013

BRAGA, P. F. A.; FRANÇA, S. C. A.; SANTOS, R. L. C. **Panorama da indústria de lítio no Brasil**. In: Anais do II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste. Part V. - Outros. Campina Grande: CETEM/UFPE. p.237-247. 2010

BRAGA, P. F. A.; SAMPAIO, J. A. Lítio. In: **Rochas e minerais industriais no Brasil: usos e especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1115>. Acesso em: 08 outubro. 2022. p.585-603. 2008

BROWN, T.; WALTERS, A.; IODINE, N.; GUNN, G.; SHAW, R. A.; RAYNER, D. Lithium: Definitions, mineralogy and deposits. **British Geological Survey**. p.39. 2016

BRUNHARA, G. F.; BRAGA, P. F. A. **Tecnologias de extração de lítio de pegmatitos**. In: Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. p.65. 2021

CORDEIRO, A. M., Oliveira, G. M. D., Rentería, J. M., & Guimarães, C. A. Revisão sistemática: uma revisão narrativa. **Revista do colégio brasileiro de cirurgiões**, v. 34, p. 428-431, 2007.

CLARKE, P. T.; SPINK, J. M. The crystal structure of β spodumene, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ -II. **Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials**, v. 130, n. 1-6, p. 420-426, 1969

DEUTSCHE, Bank. Discount-Zertifikate-Studie. p. 1-12. 2016

EVANS. K. **LITHIUM: Global Industry, Markets and Outlook to 2025**. 13th. ed. Roskill Information Services Ltd. p.230-260. 2016

FERRO, O., QUARTIERI, S., VEZZALINI, G., CERIANI, C., FOIS, E., GAMBA, A., & CRUCIANI, G. Dehydration dynamics of bikitaite: Part I. In situ synchrotron powder X-ray diffraction study. **American Mineralogist**. v.89. p.94–101. 2004

FOSU, A.Y.; KANARI, N.; BARTIER, D.; HODGE, H.; VAUGHAN, J.; CHAGNES, A. Physico-Chemical Characteristics of Spodumene Concentrate and Its Thermal Transformations. **Materials**, v. 14, n. 23, pág. 7423, 2021

GARCIA I. J. Lítio. In: Lima T.M. & Neves C.A.R. (coords.). Sumário Mineral - 2015. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 35, p. 76-77. 2016

GARRET, Donald E. Handbook of lithium and natural calcium chloride: their deposits, processing, uses and properties. **Handbook of lithium and natural calcium chloride: their deposits, processing, uses and properties. Elsevier Academic Press, Amsterdam.** p. 407. 2004

HABASHI F. Princípios de Metalurgia Extrativa, vol. IV, Gordon e Breach, EUA (1980) **Ellestad, RB, Leute**, Km, 1950. Método de extração de valores de lítio de minérios de espodumênio Patente dos EUA No. 2.516.109. 1980

HABASHI, F. A. textbook of hydrometallurgy, metallurgie extractive Quebec. Enr. Que., Canadá, 1993

HURLBUT J. R, Cornelius S. Bikitaite, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Southern Rhodesia. **American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials**, v. 42, n. 11-12, p. 792-797, 1957

INGHAM, P. D., BRETT, A., WHITE, I.R., JACKSON, S. In: Greenbushes Lithium Operations, Technical Report NI, p. 43–101. 2012

KOTSUPALO, N. P. MENZHERES L. T; RYABTEV A. D.; BOLDYREV V. V. **Mechanical activation of α -spodumene for further processing into lithium compounds.** Theoretical Foundations of Chemical Engineering. v.43. p.503–507. 2009

KUANG, Ge. LIU, Y., LI, H., XING, S., LI, F. e GUO, H. Extraction of lithium from β -spodumene using sodium sulfate solution. **Hidrometalurgia**, v. 177, p. 49-56, 2018

LANDOLT, P. E. New Horizons for Lithium. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**. v.9, n. 6, p. 766-768, 1957

LI, Chi-Tang. A estrutura cristalina do $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ III (solução sólida com alto teor de quartzo). **Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials**, v.1-6, p.327-348, 1968

LI. C.T., PEACOR D. R. A estrutura cristalina do $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ -II ("β espodumênio") Z. Krist.-Cryst. Matéria. v.126, p.46. 1968

LIMA, A., MOUTELA, P., VIEIRA, R., e VIDE, R. Valorização dos diferentes pegmatitos litiníferos da concessão mineira de Adagói (Barroso-Alvão). **Valorização de**, p. 27, 2011

LONDON, D. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, v. 101, p. 349-383, 2018

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; PIQUET, B.; COSTA, M. J.; e COELHO, J. M. Pegmatitos do Nordeste: Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado—Série Rochas e Minerais Industriais. **9ª edição. Rio de Janeiro: Ed. CETEM/MCT**. p. 79. 2003

MARGARIDO, F., VIECELI, N., DURÃO, F., GUIMARÃES, C., e Nogueira, C. Minero-metallurgical processes for lithium recovery from pegmatitic ores. **Comunicações Geológicas**, v. 101, p. 795-798, 2014

MAUTHNER, M. The History of Kunzite and the California Connection. **Rocks & Minerals**, v.6, n. 2, p. 112-131, 2011

MEDINA, L. F.; EL-NAGGAR, M. M. A. A. Um método alternativo para a recuperação de lítio de espodumênio. **Metallurgical Transactions B; (Estados Unidos)**, v. 15, n. 4. p.725-726. 1984

MENDES, M. T. S. **Perfil econômico do lítio nos países sulamericanos e consumo mundial**. Geologia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP. Rio Claro – SP. p. 46. 2009

MESHARAM, Pratima; PANDEY, BD; MANKHAND, TR. Extração de lítio de fontes primárias e secundárias por pré-tratamento, lixiviação e separação: uma revisão abrangente. **Hidrometalurgia**, v. 150, pág. 192-208, 2014

MONTENEGRO BRAVO, J. C. La Estrategia Nacional para la Industrialización del Litio y Otros Recursos Evaporíticos de Bolivia. **Reporte Metalurgico y de Materiales**, p. 45, 2010

MORAIS, C. A.; ALBUQUERQUE, R. O.; LADEIRA, A. C. Q. Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral. **Cad Temáticos Química Nov na Esc**, v. 8, p. 9-17, 2014

NASCIMENTO, M., Santos, R. L., Braga, P. F., e França, S. C. Minerais estratégicos: terras raras e lítio. **Rio de Janeiro: CETEM**, p. 273-277, 2016

NAVARRO, G, R, B.; ZANARDO A. MONTIBELLER C. C.; LEME T. G. 2017. Disponível em: < <https://museuhe.com.br/site/wp-content/uploads/2018/02/Museu-HE-ESPODUM%C3%80ANIO.pdf> >. Acesso em: 04/outubro/2022

NOVAIS, S. A. "Lítio (Li)"; Brasil Escola. Disponível. 2021 em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/litio.htm>. Acesso em 12 de outubro de 2022

OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, J.C.; BERGAMASCHI, V.S.; SENEDA, J.A.; COTRIM, M.B.; FURUSAWA, H.A.; BUSTILLOS, O.V.; PIRANI, D.A.; ANDRADE, M.N. Purificação do carbonato de lítio via troca iônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 23.,04-08 de novembro, 2018, Foz do Iguaçu, PR. Resumo... 2018. p. 4490-4490. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/29549>. Acesso em: 18 out. 2023

P. XING P. C., WANG, L., ZENG, B., MA, L., WANG, Y., CHEN, C., YANG. Hydroxysodalite Zeolite Synthesis by Hydrothermal Conversion of α -Spodumene. *Sustentação ACS. Química. Eng.*,10. p.9498-9505. 2019

PAES, Vinícius José de Castro. Projeto avaliação do potencial de lítio no Brasil. 2017.

PARTINGTON, G. A.; MCNAUGHTON, N. J.; WILLIAMS, I. S. A review of the geology, mineralization, and geochronology of the Greenbushes pegmatite, Western Australia. **Economic Geology**, v. 90, n. 3, p. 616-635, 1995

PELTOSAARI, O.; TANSKANEN P.; HEIKKINEN E. P.; FABRITIUS T. $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \beta$ -phase transformation of spodumene with hybrid microwave and conventional furnaces. **Minerals Engineering**, v. 82, p.54-60, 2015

PERETVAZHKO, I.S., e SAVINA, E.A. Tetrad effects in the rare earth element patterns of granitoid rocks as an indicator of fluoride-silicate liquid immiscibility in magmatic systems. *Petrology*. v.18, 514–543. 2010

PINTO, C. P.; BRAGA, P. F. A. **Rota de processo para produção de cloreto de lítio a partir do espodumênio**. In: VIII Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM, 2019, Rio de Janeiro. p. 1-7. 2019

GARCIA, I. J. e RAMOS, L. J. Lítio. In: Sumário Mineral. Departamento Nacional da Produção Mineral, MME, 2008 e 2009, www.dnpm.gov.br.

REBOUÇAS, L. B. **Espodumênio brasileiro como matéria-prima para produção de vitrocerâmicas**. 2017. (118f). Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017

ROBINSON, Brett H. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, [S. l.], v. 408, n. 2, p. 183–191, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>

ROSA, A. R.; KAPCZINSKI F.; OLIVA R.; BARROS H. M. T. Monitoramento da adesão ao tratamento com lítio. **Archives of Clinical Psychiatry (São Paulo)**, v. 33, p. 249-261, 2006

ROSALES, G. D.; RUIZ, M. D. C.; RODRIGUEZ, M. H. Novo processo para extração de lítio de β -espodumênio por lixiviação com HF. **Hidrometalurgia**. v. 147, p.1-6, 2014

ROSALES, G. D. RESETERA, A. C., GONZALEZ, J. A., WUILLOUD, R. G., e RODRIGUEZ, M. H. Efficient extraction of lithium from β -spodumene by direct roasting with NaF and leaching. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 150, p. 320-326, 2019

ROSKILL. **The Economics of Lithium**. London: Roskill information Services Ltd. p 255. 2002

ROSKILL. **The Economics of Lithium**. 11 ed. London: Roskill information Services Ltd, p. 255. 2009

SALAKJANI, N. K; SINGH, P.; NIKOLOSKI, A. N. Mineralogical transformations of spodumene concentrate from Greenbushes, Western Australia. Part 1: Conventional heating. **Minerals Engineering**, v. 98, p. 71-79, 2016

SANTOS, L. L. D., BIESEKI, L., BERTOLINO, L. C., OLIVEIRA, M. S. M. D., NASCIMENTO, R. M. D., PERGHER, S. B. C. Valorização da cadeia produtiva do lítio: alternativas sustentáveis para extração de lítio do espodumênio. 2020

SOU. Welsch, D. Murawski, M. Prekajski, P. Vulic, A. Kremenovic Ionic conductivity in single-crystal $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$: influence of structure on lithium mobility. **Química. Mineiro**. v. 42, p.413. 2015

TIAN, Q., CHEN, B., CHEN, Y., MA, L., e SHI, X. Roasting and leaching behavior of spodumene in sulphuric acid process. **Xiyou Jinshu/Chinese Journal of Rare Metals**, v. 35, n. 1, p. 118-123, 2011

TKACHEV, A. V.; RUNDQVIST, D. V.; VISHNEVSKAYA, N. A. The main features of lithium metallogeny in geological time. In: **Doklady Earth Sciences. Pleiades Publishing**. p. 32-36. 2019

VALE, Eduardo. O Impacto das novas tecnologias na demanda do lítio. p. 15. 2021

VIANA, P.R.M.; ARAUJO A. C.; PERES A. E. C.; SALUM M. J. G. Concentração de silicatos de lítio-uma revisão. In: **XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Santa Catarina. v. 2., p. 325-332. 2004

VIKSTRÖM, H.; DAVIDSSON, S.; HÖÖK, M. Disponibilidade de lítio e perspectivas de produção futura. **Energia Aplicada**. v. 110. p. 252-266. 2013

YAN, Q., LI, X., WANG, Z., WU, X., WANG, J., GUO, H., HU, Q., PENG, W. Extraction of lithium from lepidolite by sulfation roasting and water leaching. **International Journal of Mineral Processing**. v.1-5, p.110-111. 2012

YELATONTSEV, D.; MUKHACHEV, A. Processamento de minérios de lítio: tecnologias industriais e estudos de caso – Uma revisão. **Hidrometalurgia**, v. 201, p.105578, 2021