

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado Profissional

EFEITO DA GRANULOMETRIA DA ALIMENTAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE
ESPODUMÊNIO

Autor:

João Carlos Martins de Lelis Soares

Orientadora: Dra. Rísia Magriotis Papini

Março de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

João Carlos Martins de Lelis Soares

EFEITO DA GRANULOMETRIA DA ALIMENTAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE
ESPODUMÊNIO

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais
como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientadora: Dra. Rísia Magriotis Papini

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2021

S676e Soares, João Carlos Martins de Lelis.
Efeito da granulometria da alimentação na flotação de espodumênio
[recurso eletrônico] / João Carlos Martins de Lelis Soares. – 2021.
1 recurso online (88 f.: il., color.): pdf.

Orientadora: Rísia Magriotis Papini.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexo: f. 88.
Bibliografia: f. 82-87.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de Minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Espodumênio – Teses. 4. Flotação – Teses. 5. Materiais Granulados –
Teses. I. Papini, Rísia Magriotis. II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UFMG

EFEITO DA GRANULOMETRIA DA ALIMENTAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE ESPODUMÊNIO

JOÃO CARLOS MARTINS DE LELIS SOARES

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 24 de março de 2021.

Por:

Prof.^a Risia Magriotis Papini, Dr.^a (UFMG)
Orientadora

Prof. Gilberto Rodrigues da Silva, Dr. (UFMG)

Prof.^a Júnia Soares Alexandrino, Dr.^a (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, fortalecimento e sabedoria que me concede a cada dia.

A minha família, ao meu pai Antônio Carlos Soares, pelos ensinamentos e atenção, à minha mãe Selma Martins de Melo Soares, pelo amor e carinho, e à minha irmã Isabela Carla Soares, pela amizade.

À AMG-mineração pela oportunidade de ter sido Engenheiro de Processos do pré comissionamento, comissionamento, *start up* e posteriormente do desenvolvimento de processo com as operações consolidadas, da primeira usina de beneficiamento do Brasil de concentração de lítio/espodumênio pelo método de flotação. Agradeço a todos da AMG-mineração que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial ao Vantuir Damásio, Edmar Castro, Luís Parreiras, Lucas Fazzion, Carlos Valdir Gusmão, Tiago Silva e Adriane, pela oportunidade/apoio nos trabalhos e continuidade dos testes na planta de espodumênio.

Em especial aos professores Dra. Rísia Papini, e Dr. Paulo Viana pelas orientações e amizade, e aos demais docentes da pós-graduação da CPGEM/UFMG, e colegas do mestrado, ao Rick, Wilson e Bolivar.

RESUMO

A flotação de espodumênio da AMG-Mineração consiste em uma nova rota de concentração de espodumênio em escala industrial no Brasil. Ela constitui-se em um grande desafio de desenvolvimento dado a falta de literatura para apoio técnico, associada aos gargalos operacionais normalmente existentes em todas as usinas. Este trabalho teve como principal objetivo verificar a influência da granulometria da alimentação da flotação na recuperação metalúrgica do processo para obter-se eventual aumento de produção. Para isso, foram realizados testes de flotação em bancada e industrial, utilizando o laboratório e usina de beneficiamento da AMG-Mineração, e também conduzidos balanços metalúrgicos detalhados por faixa granulométrica. A avaliação preliminar indicou uma baixa recuperação de Li_2O nas faixas granulométricas acima de $149\mu m$, que representavam aproximadamente 50% da massa alimentada na flotação. Para melhor entender o comportamento das partículas acima de $149\mu m$, e visar aumento de recuperação, foram feitos testes em bancada flotando somente as partículas acima de $149\mu m$ e outro com material abaixo de $149\mu m$, de modo a avaliar o comportamento da recuperação final, com a divisão nessas duas faixas granulométricas. Na usina de beneficiamento, foram realizados testes elevando-se a agitação (aumento do diâmetro do rotor) do primeiro *tank cell* do estágio *rougher* e aumentando-se o tempo de condicionamento (adição de outro tanque de condicionamento). Os resultados demonstraram que a flotação em separado nas frações granulométricas $+149\mu m$ e $-149\mu m$, eleva a recuperação metalúrgica da flotação em 18%, e os teste de elevação da agitação e tempo de condicionamento na usina, ambos também elevaram a recuperação, sendo o último com elevação bem expressiva da recuperação metalúrgica global de 29%, mantendo o teor de especificação de venda do espodumênio.

Palavras-chave: espodumênio, flotação, recuperação, granulometria, condicionamento.

ABSTRACT

The AMG-Mineração spodumene flotation is a new route of concentration of spodumene on an industrial scale in Brazil. It is a major development challenge given the lack of literature for technical support, associated with the operational bottlenecks normally found in all plants. This work aimed to investigate the influence of the granulometry of flotation feed on the metallurgical recovery of the process to improve production. In this regard, detailed metallurgical balances were carried out by particle size distribution and flotation tests were conducted on bench and industrial scale using AMG-Mineração's laboratory and processing plant. The preliminary evaluation indicated a low recovery of Li_2O in the +149 μm granulometric range, which represented approximately 50% of the mass flotation feed. In order to better understand the behavior of the +149 μm particles, and aiming to increase recovery, bench tests were carried out floating separately the +149 μm and the -149 μm material, assessing the behavior of the final recovery, if the flotation feed was divided into two particle sizes. At the beneficiation plant, tests were carried out by increasing the agitation of the first tank cell rougher and increasing the conditioning time (adding another conditioning tank). The results showed that floating separately the 149 μm granulometric fraction increases the metallurgical recovery in the flotation by 18%, and that the increased agitation and conditioning time in the plant also increased the recovery, the latter with a very significant increase in the global metallurgical recovery by 29%.

Key words: spodumene, flotation, recovery, granulometry, conditioning time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Projeção de vendas de carros elétricos na Europa.....	19
Figura 3.2	Principais aplicações do lítio.....	19
Figura 3.3	Maiores reservas de lítio.....	20
Figura 3.4	Países com maiores produções de lítio.....	20
Figura 3.5	Mineral espodumênio.....	22
Figura 3.6	Desenho representativo da classe cristalográfico prismática	23
Figura 3.7	Fluxograma esquemático do processo da empresa Greenbushes.....	24
Figura 3.8	Área industrial da AMG-Mineração.....	25
Figura 3.9	Mapa geológico regional mostrando a distribuição dos principais corpos pegmatíticos explorados da Província Pegmatítica de São João Del Rei, MG.....	26
Figura 3.10	Usina de concentração de espodumênio.....	28
Figura 3.11	Fluxograma esquemático da usina de concentrado de espodumênio	30
Figura 3.12	Tanque de regularização (TQ01).....	31
Figura 3.13	Fluxograma da flotação de espodumênio da AMG-Mineração.....	33
Figura 3.14	Recuperação metalúrgica de lítio e ferro x tamanho - análise prévia.....	35
Figura 3.15	Desenho esquemático do <i>tank cell</i>	37
Figura 3.16	Modelo de célula de flotação convencional.....	38
Figura 3.17	Desenhos esquemáticos de rotores e estatores.....	38
Figura 3.18	Desenho esquemático de coluna de flotação.....	39
Figura 3.19	Tanque de condicionamento de polpa.....	43
Figura 4.1	Amostrador metalúrgico multi-estágio (MSA).	45
Figura 4.2	Amostrador modelo ASA	47
Figura 4.3	Célula de bancada da AMG-Mineração.....	47
Figura 4.4	Desenho esquemático do rotor do <i>tank cell</i>	48
Figura 4.5	Novo sistema de condicionamento da flotação de espodumênio.	49
Figura 4.6	Linha do tempo da execução dos testes industriais.....	49

Figura 5.1 Comparativo recuperação de lítio: avaliação prévia da usina x flotação em bancada material +149 μ m.....	51
Figura 5.2 Comparativo recuperação de ferro: avaliação prévia da usina x flotação em bancada material +149 μ m.....	51
Figura 5.3 Comparativo recuperação global de lítio: avaliação prévia da usina x flotação em bancada material +149 μ m.....	53
Figura 5.4 Comparativo recuperação global de ferro: avaliação prévia da usina x flotação em bancada material -149 μ m.....	53
Figura 5.5 Comparativo recuperação metalúrgica global de lítio: avaliação prévia da usina x flotação em bancada.....	55
Figura 5.6 Comparativo recuperação metalúrgica global de ferro: avaliação prévia da usina x flotação em bancada.....	55
Figura 5.7. Recuperação metalúrgica por faixa de lítio e ferro - elevação da agitação da polpa do <i>tank cell rougher</i>	57
Figura 5.8. Recuperação metalúrgica de lítio: avaliação prévia da usina (antes) x elevação da agitação de polpa do <i>tank cell rougher</i> (depois).....	58
Figura 5.9. Recuperação metalúrgica de ferro: avaliação prévia da usina (antes) x elevação da agitação de polpa do <i>tank cell rougher</i> (depois).....	59
Figura 5.10. Recuperação metalúrgica de lítio e ferro por faixa granulométrica – aumento do tempo de condicionamento.....	61
Figura 5.11. Recuperação metalúrgica de ferro por faixa granulométrica – aumento do tempo de condicionamento.....	61
Figura 5.12. Recuperação metalúrgica de lítio por faixa granulométrica – aumento do tempo de condicionamento.....	62
Figura 5.13. Recuperação metalúrgica de lítio: avaliação prévia (antes) x aumento do tempo de condicionamento (depois).....	63
Figura 5.14. Recuperação metalúrgica de ferro: avaliação prévia (antes) x aumento do tempo de condicionamento (depois).....	64
Figura 5.15 Recuperações metalúrgica x índice de seletividade nos testes industriais.....	66
Figura 5.16. Granulometria de alimentação dos testes industriais.....	67

Figura 5.17. Granulometria dos concentrados dos testes industriais.....	68
Figura 5.18. Teor de ferro faixa granulométrica na alimentação – Avaliação prévia.....	69
Figura 5.19. Teor de ferro por faixa granulométrica de alimentação – teste elevação de agitação da polpa do <i>tank cell rougher</i>	69
Figura 5.20. Teor de ferro faixa granulométrica da alimentação – aumento do tempo de condicionamento.....	70
Figura 5.21. Comparativo de recuperação metalúrgica de lítio por faixa granulométrica nos testes industriais.....	72
Figura 5.22. Comparativo de recuperação metalúrgica de ferro por faixa granulométrica nos testes industriais.....	73
Figura 5.23. Comparativos de recuperação metalúrgica global de lítio dos testes industriais e teste de bancada.....	74
Figura 5.24. Comparativos de recuperação metalúrgica global de ferro dos testes industriais e teste de bancada.....	75
Figura 5.25. Recuperação metalúrgica de lítio das faixas granulométricas +149 μ m.....	76
Figura 5.26. Recuperação metalúrgica de ferro das faixas granulométricas +149 μ m.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1. Principais minerais portadores de lítio.....	21
Tabela III.2. Recuperação por faixa – análise prévia.....	34
Tabela V.1. Recuperação metalúrgica material +149 μ m – teste de bancada.....	50
Tabela V.2. Recuperação metalúrgica material –149 μ m – teste de bancada.....	52
Tabela V.3. Recuperação metalúrgica global – teste de bancada.....	54
Tabela V. 4. Recuperação metalúrgica por faixa - elevação da agitação da polpa no <i>tank cell rougher</i>	56
Tabela V.5. Recuperação metalúrgica por faixa – aumento de tempo de condicionamento.....	60
Tabela V.6. Dados resumidos de teores e recuperação metalúrgica global dos testes industriais.....	65
Tabela V.7. Dados resumidos de granulometria dos testes industriais.....	67
Tabela V.8. Maiores e menores recuperações metalúrgicas das frações granulométricas nos testes industriais	71
Tabela V.9. Comparativo de recuperação metalúrgica de lítio por faixa granulométrica entre os testes industriais.....	72
Tabela V.10. Comparativo de recuperação metalúrgica de ferro por faixa granulométrica entre os testes industriais.....	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA	17
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Lítio	18
3.1.1 Aplicações	18
3.3 Reservas e produção de lítio	20
3.4 Minerais portadores de lítio	21
3.4.1 Espodumênio	21
3.5 Processo de produção de lítio (Brasil x Mundo).....	23
3.6 A empresa AMG-Mineração.....	25
3.6.1 Geologia da região	26
3.6.2 Usina de beneficiamento de espodumênio.	27
3.6.3 Aspectos gerais da flotação	32
3.6.4 Flotação de espodumênio.....	32
3.6.5 Análise prévia da flotação de espodumênio da AMG-Mineração	34
3.7 Equipamentos de flotação	36
3.7.1 <i>Tank Cell</i>	36
3.7.2 Célula convencional	37
3.7.3 Coluna de flotação.....	38
3.8 Variáveis na flotação.....	39
3.8.1 Granulometria de alimentação	39
3.8.2 Agitação da polpa.....	41
3.8.3 Condicionamento da polpa.....	42
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1. Amostras	44
4.1.1 Análises granuloquímicas	45
4.3 Testes de flotação.....	46

4.3.1 Testes em bancada com alimentação da flotação - granulometria (+149 μ m) e (-149 μ m)	46
4.3.3. Teste industrial: elevação da agitação da polpa	48
4.3.4 Teste industrial: aumento do tempo de condicionamento	48
4.3.3 Configuração da flotação para os testes industriais	49
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Resultados testes de bancada	50
5.1.1 Teste flotação material +149 μ m.....	50
5.1.2 Teste de flotação material -149 μ m.....	52
5.1.3 Recuperação global com material +149 μ m e -149 μ m.....	53
5.2 Testes industriais.....	56
5.2.1 Teste na usina de concentrado de espodumênio de elevação de agitação de polpa.....	56
5.2.2 Análise e comparação dos resultados – agitação de polpa.....	57
5.2.3 Teste na usina de concentrado de espodumênio de aumento do tempo de condicionamento	59
5.2.4 Análise e comparação dos resultados – tempo de condicionamento	63
5.3 Avaliação geral dos testes industriais	65
5.3.1 Frações granulométricas com maiores e menores recuperações	70
5.3.2 Comparação da recuperação metalúrgica por faixa granulométrica	72
5.4 Avaliação geral dos testes de bancada com os testes industriais.	74
6. CONCLUSÕES.....	78
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
8. REFERÊNCIAS.....	82
ANEXO I. FLUXOGRAMA CBL	88

LISTA DE NOTAÇÕES

AMG: *Advanced Metallurgical Group* – Grupo avançado metalúrgico

DNPM: Departamento Nacional De Produção Mineral, atual ANM: Agência Nacional de
Mineração

Li₂O: óxido de lítio

Fe₂O₃: óxido de ferro

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

pH: potencial hidrogeniônico

MSA: amostrador metalúrgico multiestágio

ASA: amostrador estático

1. INTRODUÇÃO

No desenvolver da tecnologia, e com a emergente demanda de baterias para carros híbridos e/ou elétricos, o lítio se torna um metal singular, com grande potencial de utilização, despertando um interesse mundial.

Segundo, BRAGA, FRANÇA E CELINO (2013), as propriedades do lítio que o tornam um metal de grande interesse são: consiste em um dos metais mais leves, com alta reatividade e grande potencial eletroquímico, baixo coeficiente de expansão térmica e alto poder calorífico e formação de uma liga muito leve e resistente com o alumínio. Essas propriedades o tornam um elemento muito especial para uso em pilhas e baterias, e na fabricação ou no recobrimento de vidros e cerâmicas, além do uso na indústria aeronáutica. O uso crescente de baterias recarregáveis (íon-lítio), somados às projeções da demanda futura para os veículos elétricos e/ou híbridos tem promovido um desejo global pelo lítio.

Segundo a CPRM (2017), os países que se destacam com as maiores reservas de lítio são, Chile, China e Argentina. Em termos de produção Chile e Austrália se destacam no mercado internacional. As maiores empresas produtora de lítios são Albemarle no Chile, SQM no Chile, Talison Lithium na Austrália e Ganfeng Lithium na China.

De acordo com VIANA (2006), o mineral mais comum portador de lítio, no Brasil, é o silicato espodumênio. No território brasileiro, a produção está praticamente restrita aos pegmatitos do estado de Minas Gerais.

Para o Brasil, a importância da produção de lítio se torna bem atrativa buscando reduzir a dependência de importações e para desenvolvimento do processo desta área, de modo a elevar a produtividade e diminuir os custos.

O Brasil apresenta reservas com grandes potenciais de produção, principalmente no estado de Minas Gerais, nas regiões de Araçuaí/Itinga, Conselheiro Pena-Divino das Laranjeiras, Santa Maria do Suaçuí e São João Del Rei.

Esta dissertação, devido a necessidade do aumento da produção espodumênio/lítio, busca estudar a concentração do mesmo pelo método de flotação sendo uma rota inédita no Brasil em escala industrial. Assim, o presente trabalho visa explorar este processo fornecendo informações importantes para o desenvolvimento acadêmico e industrial do lítio no Brasil.

2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

Objetivo geral:

Estudar a concentração de lítio, no Brasil, pelo método de flotação em bancada e em escala industrial.

Objetivos específicos:

- Conhecer a granulometria e distribuição de lítio na alimentação da flotação de espodumênio através de análises granuloquímicas.
- Estudar a influência do aumento da agitação de polpa e elevação do tempo de condicionamento na flotação em escala industrial;
- Realizar testes de flotação em bancada, divididos em duas faixas granulométricas, (+149 μ m e -149 μ m), para análise das recuperações finais.

A relevância deste trabalho está relacionada a necessidade de desenvolvimento do processo de produção do concentrado de espodumênio, em escalas de produções maiores, e através de outros métodos de concentração, como a flotação. A busca de aumento da produção está diretamente relacionada a grande aplicabilidade desse concentrado na produção de baterias de lítio, utilizadas em celulares, *laptops*, entre outros acessórios, e a emergente demanda pelas mesmas em automóveis elétricos e/ou híbridos.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lítio

O lítio é um elemento químico de símbolo Li, número atômico 3 e massa atômica 7u, contendo em sua estrutura três prótons, três elétrons e 4 nêutrons. Na tabela periódica dos elementos químicos, o elemento pertence ao grupo ou família 1 (anteriormente denominado 1A), entre os elementos alcalinos.

Na sua forma pura, o lítio é um metal macio, de coloração branca prateada, que se torna rapidamente oxidado no ar ou na água (PINHEIRO, 2011).

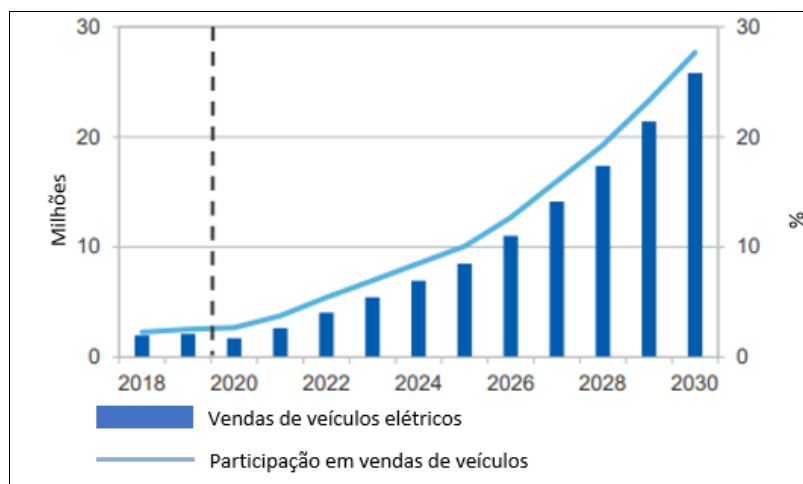
3.1.1 Aplicações

O hidróxido de lítio (LiOH) e o carbonato de lítio (Li₂CO₃) são as principais formas em que o lítio é usado industrialmente. São considerados como derivados mútuos, pela carbonatação e decarbonatação, respectivamente. Tanto o carbonato quanto o hidróxido de lítio são insumos básicos para a obtenção de grande variedade de outros produtos de lítio (Braga & França, 2013).

Dentre as aplicações do lítio, se destaca a sua funcionalidade em baterias elétricas, devido ao seu elevado potencial eletroquímico. A figura 3.1 apresenta uma das grandes demandas futuras para utilização de lítio, devido a projeção de elevação da utilização de carros elétricos.

Além desta aplicação, na figura 3.2 estão apresentadas um resumo das principais aplicações do lítio nos diversos setores industriais, baseadas em estudo de mercado realizado pela empresa FMC *Lithium Division* (Norris, 2012 apud Braga & França, 2013).

Figura 3.1. Projeção de vendas de carros elétricos na Europa.



Fonte: Adaptado de *Resources and Energy*, 2020.

Figura 3.2. Principais aplicações do lítio.

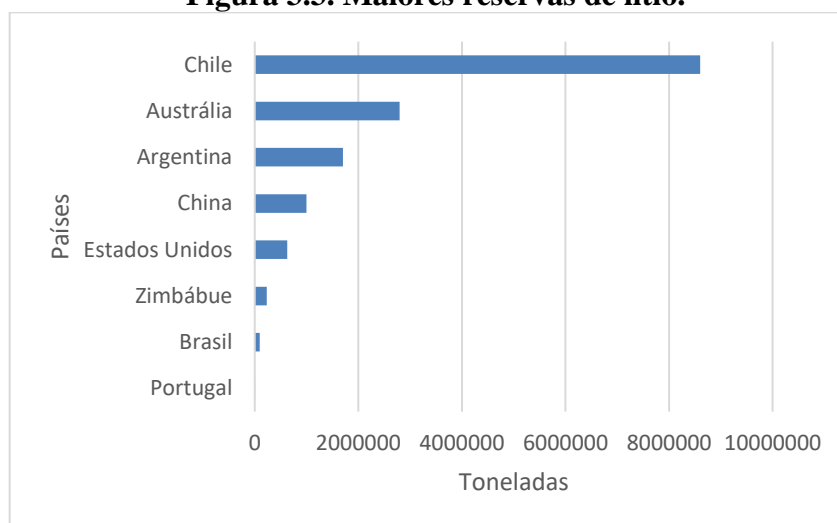
Carbonato	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias secundárias • Vidros e cerâmicas • Tratamento de ar • Industrial/construção/outros
Hidróxido	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias secundárias • Graxas • Tratamento de ar • Industrial/construção/outros
Cloreto	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxos de solda • Controle de umidade • Sistemas de secagem
Especialidades inorgânicas	<ul style="list-style-type: none"> • Farmacêutico • Catalisadores / reagentes
Metal	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias primárias • Ligas de lítio
Organo - Lítio	<ul style="list-style-type: none"> • Farmacêutico • Elastômeros • Cristais líquidos

Fonte: Adaptado de Norris, 2012 apud Braga & França, 2013.

3.3 Reserva e produção de lítio

As maiores reservas de lítio estão situadas principalmente nos países Chile, Austrália e Argentina. O Chile (figura 3.3), é o país com maior reserva de lítio, na ordem de 8,6 milhões de toneladas. O Brasil aparece com reservas em torno de 95 mil toneladas de lítio.

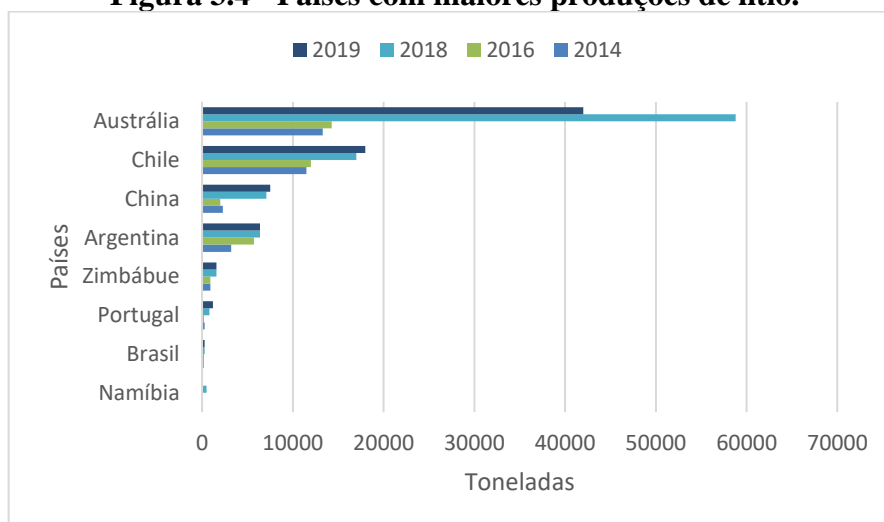
Figura 3.3. Maiores reservas de lítio.



Fonte: Adaptado de Statista, 2019.

Em relação a produção mundial de lítio, na figura 3.4 observa-se que os países Austrália e Chile são os maiores produtores. Destaca-se a produção da Austrália no ano de 2018 que atingiu valor próximo de 59 mil toneladas, a maior nos últimos 6 anos.

Figura 3.4 - Países com maiores produções de lítio.



Fonte: Adaptado de Statista, 2020.

Segundo o Resumo de Mercadorias Mineraias (2020), o consumo global de lítio em 2019 foi de 58 mil toneladas de lítio, o que representa um aumento de 18% em relação ao ano de 2018. No entanto, o consumo foi inferior ao previsto pela indústria do lítio devido principalmente a redução dos subsídios aos veículos elétricos pela China.

3.4 Mineraias portadores de lítio

Segundo Braga e Sampaio (2008), os mineraias de lítio ocorrem na natureza predominantemente em pegmatitos graníticos, que são rochas ígneas de granulometria grossa compostas por quartzo, feldspato e mica. O espodumênio é um dos mineraias em que o lítio ocorre, geralmente, como um mineral acessório nos pegmatitos.

Na tabela III.1, é apresentado os principais mineraias portadores de lítio no Brasil e seus respectivos teores.

Tabela III.1. Principaias mineraias portadores de lítio.

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

Fonte: Hauber, 2002.

3.4.1 Espodumênio

O mineral espodumênio (figura 3.5) é a principal fonte do lítio. No qual, o lítio é de grande atratividade devido, dentre outras características, ser o metal de maior leveza existente.

Figura 3.5. Mineral espodumênio.

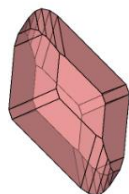


Fonte: UNESP, 2019.

Suas características mineralógicas são:

- Classe: Silicatos;
- Grupo: Inossilicatos;
- Subgrupo: piroxênios;
- Fórmula: $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$;
- Sistema: monoclinico;
- Classe Cristalográfica: Prismática (figura 3.6);
- Hábito: comumente maciço, em forma de agregados granulares;
- Clivagem: Boa a perfeita;
- Tenacidade: Quebradiço;
- Cor: Verde, Branco, Amarelo, Lilás, Rosa, Púrpura;
- Dureza: 6,5- 7;
- Densidade: 3,03 -3,23 g/cm³;
- Magnético: Não.

Figura 3.6. Desenho representativo da classe cristalográfica prismática do espodumênio.



Fonte: UNESP, 2019.

Em termos de gênese o espodumênio é de origem magmática, hidrotermal, pneumatolítica e não comumente metamórfica. O mineral é um constituinte frequente em granitos pegmatíticos, como no caso da jazida mineral da AMG-Mineração (AMG, 2018).

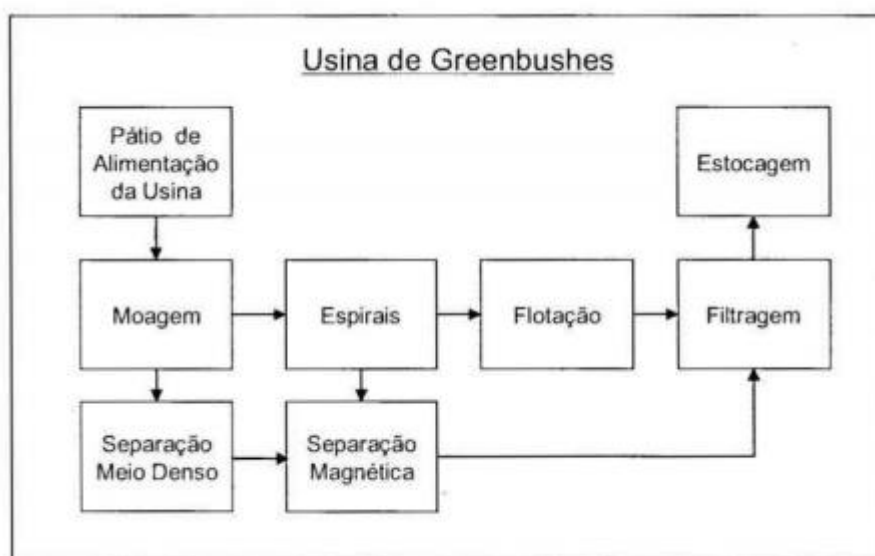
3.5 Processo de produção de lítio (Brasil x Mundo)

Em relação ao método de produção de lítio mundialmente, é possível citar a aplicação de diferentes métodos de concentração: espirais concentradoras, meio denso, e flotação, tendo também etapa de separação magnética para adequação de teor de ferro à especificação de venda.

Em empresas que utilizam flotação na concentração de espodumênio, pode existir uma etapa anterior para remoção de micas, feldspato e/ou quartzo, como, segundo Banks (1953) ocorre na Carolina do Norte nos Estados Unidos, e na empresa Tanco no Canadá (mina de *Bernic Lake*), que apresentam flotação de mica anteriormente a flotação de espodumênio (Viana, 2004).

A figura 3.7, apresenta o fluxograma da empresa *Greenbushes*, uma das maiores mineradoras de lítio, situada no sudoeste da Austrália.

Figura 3.7. Fluxograma esquemático do processo da empresa *Greenbushes*.



Fonte: Viana, 2004.

Em relação ao Brasil, antes da entrada da empresa AMG-Mineração no mercado de lítio, o processo de produção estava restrito principalmente com a empresa Companhia Brasileira de Lítio (CBL), com método de concentração exclusivamente por meio denso, sendo este o método utilizado em escala industrial no Brasil até então.

Na CBL, a usina de beneficiamento é alimentada pelo Pegmatito Litinífero, que passa por britagem primária e secundária, e classificação granulométrica, conforme anexo I. Após essas etapas, o minério é processado em unidade de meio-denso, obtendo-se o concentrado de espodumênio, sendo o produto final das operações da Mina da Cachoeira. A usina tem capacidade de produção de 30 mil toneladas e um teor de concentrado de 5,5% de lítio (Companhia brasileira de lítio, 2018).

Atualmente, com a inserção da AMG-Mineração no mercado do lítio, o Brasil, passou a produzir concentrado de lítio, em escala de produção maior, com uma usina de capacidade de 90 mil toneladas e por método de flotação direta, antecedida por separação magnética.

3.6 A empresa AMG-Mineração

A AMG-Mineração é uma empresa global de materiais críticos na vanguarda da tendência de redução de CO₂. A empresa possui operações em diversos países como Estados Unidos, China, África, Alemanha, entre outros, com produções de minérios de Vanádio, Cromo, Molibdênio, Tântalo, Titânio, Lítio.

No Brasil, a AMG-Mineração destaca-se na produção de Tântalo e no fato de ter implantado a primeira planta de concentração de lítio em escala industrial por flotação, além de produções de Alumínio, Nióbio, Estanho e Feldspato. A figura 3.8 apresenta uma foto da construção do projeto lítio (números 4, 5, 6, e 7).

Figura 3.8. Área industrial da AMG-Mineração.



Fonte: Adaptado de AMG lithium, 2019.

Legenda:

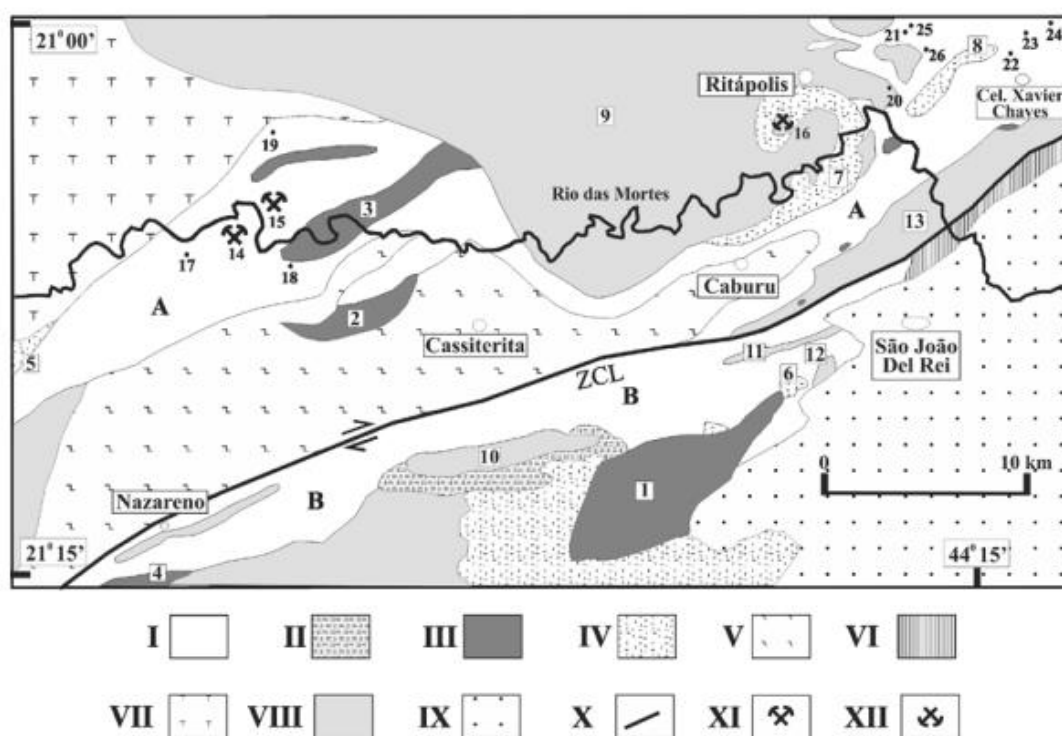
- (1) Barragens 1 e 2, (utilizadas como uma das fontes de alimentação da planta de concentrado de espodumênio);
- (2) Planta de Britagem;
- (3) Torre de concentração gravimétrica de Tântalo 1;
- (4) Planta de espodumênio: localização das etapas de classificação, moagem, separação magnética, espessamento e flotação;
- (5) Planta de espodumênio: prédio das salas de controle, reuniões, automação, TI.

- (6) Planta de espodumênio: área da filtragem, secagem e controle e estocagem de material em silos;
 (7) Planta de espodumênio: pátio de estocagem de concentrado de espodumênio em *big bags*.

3.6.1 Geologia da região

A empresa AMG-mineração está localizada no distrito pegmatítico de São João Del Rei. O Distrito Pegmatítico de São João Del Rei (designado como “província” por Francesconi, 1972) engloba uma área de cerca de 1.400 km² situada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais (Figura 3.9). Essa área abrange os municípios de Nazareno, São Tiago, Resende Costa, Cassiterita (atual Conceição da Barra de Minas), São João Del Rei, Ritápolis e Coronel Xavier Chaves, cujos pegmatitos são minerados principalmente para cassiterita e columbita-tantalita (Chaves,2018).

Figura 3.9. Mapa geológico regional dos principais corpos pegmatíticos explorados da Província Pegmatítica de São João Del Rei, MG.



Legenda: I - Greenstone belts: (A) Rio das Mortes e (B) Nazareno. II - Peridotito-Piroxenito Forro. III - Piroxenitos/gabros (1 a 4). IV - Dioritos/quartzo dioritos (5 a 8). V - Tonalito-Trondhjemito Cassiterita. VI – Sub-vulcânicas félsicas parcialmente milonitizadas. VII - Trondhjemito Tabuões. VIII - Granitóides paleoproterozoicos (9 a 13). IX - Rochas metassedimentares proterozóicas: Megassequências São João del

Rei (Paleoproterozoico - Estateriano), Carandaí (Mesoproterozoico) e Andrelândia (Neoproterozoico). X - Falha transcorrente. XI - Mina ativa. XII - Mina desativada. ZCL – Zona de Cisalhamento do Linheiro. (1) Gabro São Sebastião da Vitória, (2) Piroxenito-Gabro Manuel Inácio, (3) Gabro Rio dos Peixes, (4) Gabro Rio Grande, (5) Diorito Rio Grande, (6) Quartzo Diorito do Brito, (7) Diorito Brumado, (8) Quartzo Monzodiorito Glória, (9) Granitóide Ritápolis, (10) Granitóide do Lajedo, (11) Granodiorito Brumado de Baixo, (12) Suíte Serrinha (Granodiorito Brumado de Cima e corpos granofíricos), (13) Gnaiss Granítico Fé, (14) Mina do Volta Grande, (15) Mina Minas Brasil, (16) Mina do Paiol, (17) Pegmatito do Fundão, (18) Pegmatito Serra, (19) Pegmatito do Fumal, (20) Pegmatito Olaria, (21) Pegmatito Penedo, (22) Pegmatito Mato Virgem, (23) Pegmatito Sossego, (24) Pegmatito Cascalho Preto, (25) Pegmatito Cavalo do Buraco, (26) Pegmatito Prainha.

Fonte: Modificado de ÁVILA, 2003, apud PEREIRA et al., 2011.

A mina de Volta Grande da AMG-mineração é caracterizada por corpos de grandes dimensões de pegmatito, ricos em espodumênio. De acordo com Queménéur et al. (2003), o espodumênio constitui entre 10-15% dos minerais nesses pegmatitos.

JAHNS (1955) define o pegmatito como rochas holocristalinas que apresentam, pelo menos em parte, uma granulação muito grosseira, contendo como maiores constituintes minerais encontrados tipicamente em rochas ígneas comuns, mas com a característica de apresentarem extremas variações no que se refere ao tamanho dos grãos.

O pegmatítico granítico, que é o encontrado nesta região da mina de Volta Grande, contém elementos como Silício (Si), Alumínio (Al), Potássio (K), Sódio (Na) e Cálcio (Ca). Existem outros elementos que estão dispersos nas rochas graníticas que se concentram nos pegmatitos sob a forma de minerais particulares, como por exemplo: Berilo (Be), Ambligonita ((Li,Na)(AlPO₄)(F,OH)), Espodumênio (LiAlSi₂O₆), Tantalita-columbita ((Fe,Mn)(Nb,Ta)₂O₆), Apatita (Ca₅(PO₄)₃(F,OH,Cl)) e Monazita. Devido a essas concentrações, os pegmatitos são fontes de elementos químicos aplicáveis a vários processos de beneficiamento industrial (Vidal; Nogueira; Araújo, 2005).

3.6.2 Usina de beneficiamento de espodumênio

Na figura 3.10, pode-se observar a Usina de beneficiamento de espodumênio da AMG.

Figura 3.10. Usina de beneficiamento de espodumênio da AMG.



Fonte: próprio autor.

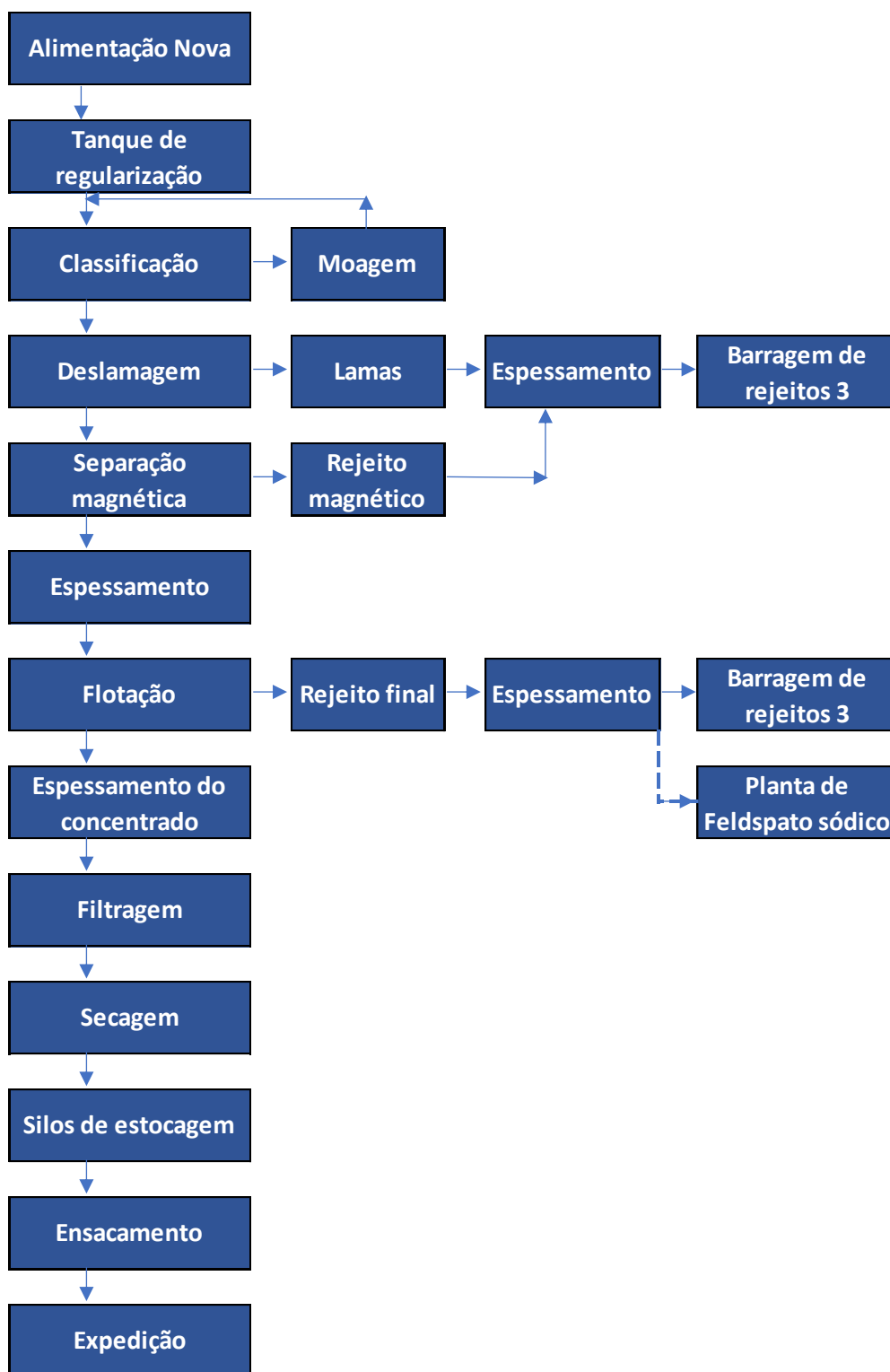
Na figura 3.11 tem-se o fluxograma de processo simplificado da planta de concentração de espodumênio. A taxa de alimentação da usina é de aproximadamente 96 t/h. Na planta, tem-se a alimentação nova, que pode ser advinda de bombeamento dos rejeitos das plantas de Tântalo 1 e 2, ou a alimentação via pilha com carregadeira ou caminhão na moega presente no platô 1. Em suma, a planta de espodumênio pode ser alimentada com a combinação de até seis fontes de alimentações diferentes. As fontes possíveis de alimentação são, o overflow (OF1) e underflow (UF1) do hidrociclone da planta 01 de tântalo, overflow (OF2) e underflow (UF2) do hidrociclone da planta 02 de tântalo, rejeitos da barragem, e pilhas de estocagem. Após a alimentação da usina, tem-se uma etapa de classificação, de modo que o *underflow* é direcionado para alimentação dos moinhos e o *overflow* é direcionado para a etapa seguinte de deslamagem (circuito reverso). Na deslamagem são retiradas as lamas do material, onde o *overflow* é direcionado para o espessador de lamas e rejeito magnético, e posteriormente é bombeado para a barragem de rejeitos 3. O *underflow* da deslamagem é direcionado para a etapa de separação magnética, onde o rejeito magnético é direcionado para o espessador de lamas e rejeito magnético. O material não magnético segue para a etapa de espessamento, e posteriormente alimenta o tanque de condicionamento, e em seguida a flotação. O rejeito da flotação é espessado e bombeado para a barragem de rejeitos 3 ou para a planta de feldspato. O concentrado da flotação segue para as etapas de desaguamento, onde é espessado, filtrado e secado para obter-se umidade < 2%. A partir deste ponto, o material vai para os silos de controle de qualidade, estocagem e posteriormente segue para ser

ensacado e expedido.

A mineralogia da alimentação da planta pode variar de acordo com as fontes de alimentação. A mineralogia de referência é (AMG-MINERAÇÃO, 2017):

- Quartzo (SiO_2): 33,26%;
- Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$): 28,32%;
- Microclina ($\text{K(AlSi}_3\text{O}_8)$): 14,45%;
- Espodumênio (LiAlSiO_4): 12,61%;
- Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$): 4,98%;
- Zinnwaldita ($\text{KLiFe}^{2+}\text{Al(AlSi}_3\text{)O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$): 4,05%;
- Holmquistita ($\text{Li}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$): 1,75%.

Figura 3.11. Fluxograma da usina de beneficiamento de espodumênio.



Fonte: Próprio autor.

Todas as fontes de alimentação podem ser misturadas no tanque de regularização, buscando uma homogeneidade da alimentação do circuito de moagem (figura 3.12).

Figura 3.12. Tanque de regularização.



Fonte: AMG-Mineração, 2018.

3.6.3 Aspectos gerais da flotação

Flotação em espuma, ou simplesmente flotação, é um processo de concentração aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies minerais presentes, tratando misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa, nas quais se introduz uma fase gasosa (PERES, 1980).

A concentração ocorre quando os minerais que são hidrofóbicos, por natureza ou por modificação da superfície por reagentes, se aderem às bolhas de ar introduzidas no processo, sendo descarregados no flotado. Os minerais que são hidrofílicos por natureza ou por modificação da superfície são descarregados no afundado. A concentração do minério de interesse pode ocorrer tanto pelo flotado (flotação direta), quanto pelo afundado (flotação reversa). Dentre as variáveis operacionais na flotação, destaca-se

percentual de sólidos, aeração, agitação, tempo de residência, granulometria de alimentação, liberabilidade, entre outros.

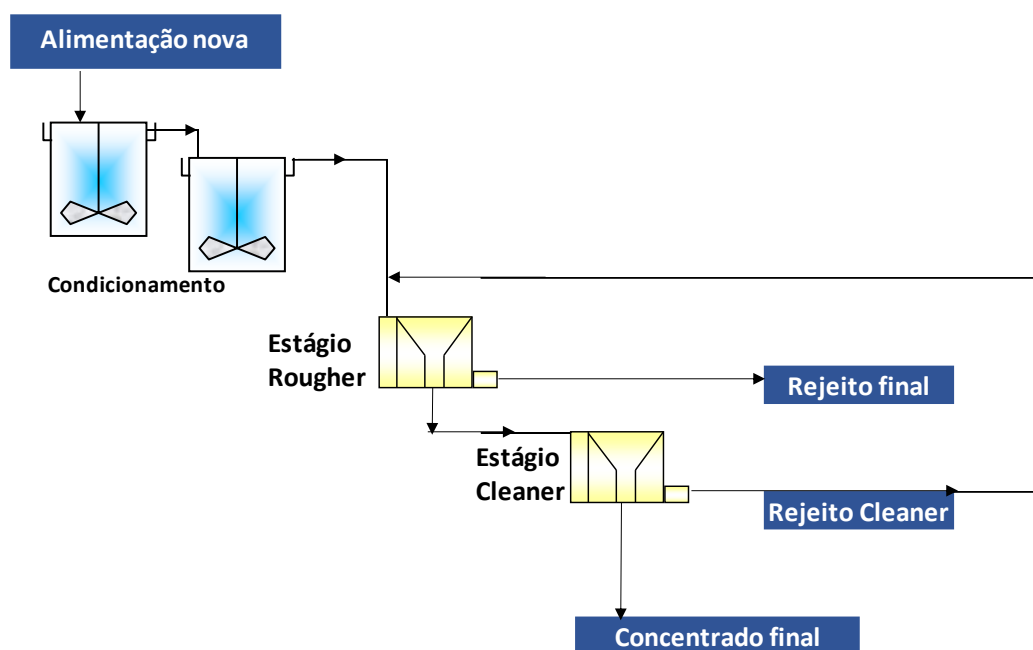
Segundo BALTAR (2008), para que ocorra flotação são necessárias três etapas fundamentais denominadas colisão, adesão e transporte que estão diretamente relacionadas à otimização do processo.

As três etapas da flotação dependem diretamente de fenômenos hidrodinâmicos. A colisão é beneficiada pela agitação, a adesão espontânea depende da interação bolha/partícula, que é favorecida pela hidrofobicidade da partícula, enquanto o transporte depende da estabilidade do agregado e da espuma. Desta forma, o sucesso da flotação inclui sinergismo das três etapas do processo, que devem ser bem-sucedidas (Baltar, 2008).

3.6.4 Flotação de espodumênio

A flotação do espodumênio na AMG-mineração ocorre por flotação direta e em duas etapas, *rougher* e *cleaner*, conforme figura 3.13.

Figura 3.13. Fluxograma da flotação de espodumênio da AMG-Mineração.



Fonte: próprio autor.

Antes da etapa de flotação, existe o estágio de condicionamento (16,8 minutos), onde são adicionados junto à alimentação nova, o reagente coletor, sendo um ácido graxo para flotar o espodumênio, e soda cáustica para regularização do pH próximo a 10.

Posteriormente o material, com aproximadamente 30-35% de sólidos, segue para o estágio *rougher* composto por 5 *tank cells* com volume de 10m³ cada.

A alimentação *rougher* é a combinação do produto não magnético espessado (alimentação nova) e o rejeito do estágio *cleaner* (carga circulante). O concentrado *rougher* é bombeado para o estágio *cleaner*. O rejeito *rougher* é direcionado para o espessador de rejeito.

O estágio *cleaner* é composto por 4 células modelo *OK-Cell*, com volume de 3m³ cada. O rejeito do estágio *cleaner* retorna para a alimentação *rougher*, como carga circulante. O concentrado *cleaner* é considerado concentrado final (AMG-MINERAÇÃO, 2017). As principais variáveis controladas na etapa de flotação são: vazão de ar, nível de polpa, percentual de sólidos e adição de reagentes.

3.6.5 Análise prévia da flotação da AMG-Mineração

Para uma avaliação da performance da flotação em escala industrial da AMG, foram analisadas as recuperações por faixas granulométricas nas frações de 177 μ m, 149 μ m, 105 μ m, 53 μ m, 44 μ m e <44 μ m. O resultado prévio da recuperação por faixa granulométrica, está na tabela III-2.

Tabela III.2. Recuperação por faixa – análise prévia.

Faixa granulométrica (μ m)	Produto	Retido simples (%)	Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Teor Li ₂ O (%)	Recuperação metalúrgica Fe ₂ O ₃ (%)	Recuperação metalúrgica Li ₂ O (%)
177	Alimentação	22,1	0,4	1,0	100,0	100,0
	Concentrado	85,0	0,7	5,2	62,8	28,1
	Rejeito	32,0	0,2	0,7	37,2	71,9
149	Alimentação	27,3	0,3	1,5	100,0	100,0
	Concentrado	4,1	0,5	6,1	65,0	56,4
	Rejeito	14,3	0,1	0,7	35,0	43,6
105	Alimentação	19,5	0,3	1,4	100,0	100,0
	Concentrado	17,4	0,5	6,2	66,4	68,7
	Rejeito	19,5	0,1	0,5	33,6	31,3
74	Alimentação	14,3	0,3	1,4	100,0	100,0
	Concentrado	19,6	0,6	5,8	75,8	76,8
	Rejeito	12,4	0,1	0,4	24,2	23,2
53	Alimentação	9,5	0,4	1,5	100,0	100,0
	Concentrado	16,6	0,8	5,0	46,2	81,3
	Rejeito	9,2	0,3	0,4	53,8	18,7
44	Alimentação	3,6	0,5	1,6	100,0	100,0
	Concentrado	14,1	1,1	4,3	73,7	86,2
	Rejeito	4,3	0,2	0,3	26,3	13,8
<44	Alimentação	3,6	0,7	1,7	100,0	100,0
	Concentrado	27,3	1,7	3,6	86,2	87,0
	Rejeito	8,3	0,2	0,4	13,8	13,0
Amostra Total	Alimentação		0,3	1,3	100,0	100,0
	Concentrado		1,0	4,9	57,5	65,4
	Rejeito		0,2	0,6	42,5	34,6

Fonte: próprio autor.

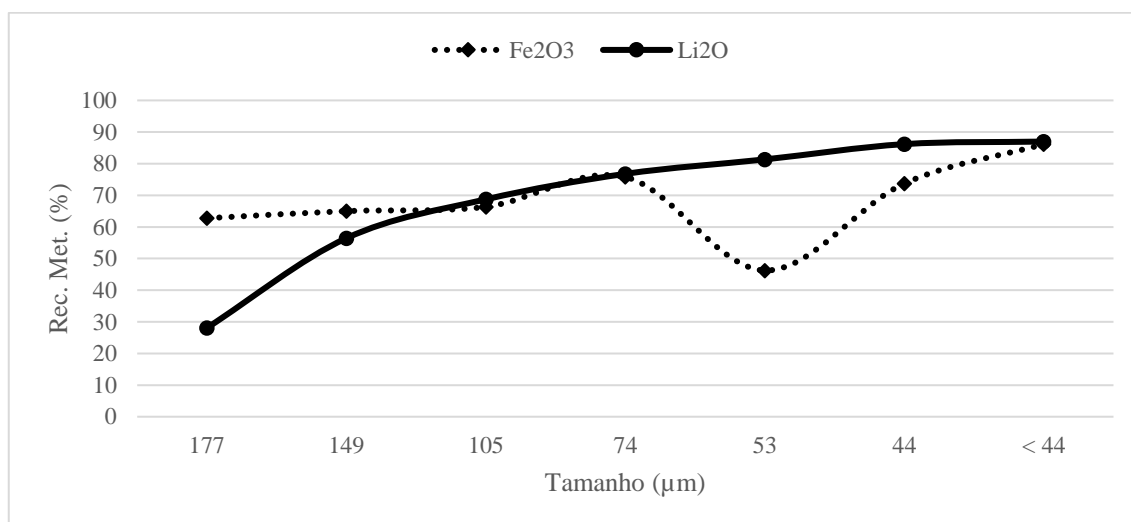
O teor de concentrado obtido foi de 4,9% para uma especificação de venda de 5,5%. Sendo assim, pode-se afirmar que para atingir esse teor, ajustes na flotação devem ser

realizados. Tendo em vista que, para incremento do teor, é necessário elevar a seletividade da flotação e conseqüentemente resulta em uma redução da recuperação.

Para auxiliar no entendimento dos dados levantados, foram feitos gráficos para análise da recuperação metalúrgica.

A figura 3.14 representa a recuperação metalúrgica do concentrado da flotação do espodumênio por faixa granulométrica, em relação aos óxidos de Li_2O e Fe_2O_3 .

Figura 3.14. Recuperação metalúrgica de lítio e ferro x tamanho - análise prévia.



Fonte: próprio autor.

Percebe-se nitidamente a baixa recuperação do Li_2O nas faixas granulométricas acima de $149\mu\text{m}$, que representam aproximadamente 50% da massa alimentada na flotação. Vale ressaltar que, o teor de Li_2O nestas faixas pode ser avaliado como um bom teor de Li_2O (média 1,2%). Assim, pode-se dizer que, uma das causas do rejeito apresentar-se com teor de 0,56% (objetivado 0,32%) é devido à baixa recuperação das partículas de Li_2O nestas faixas acima de $149\mu\text{m}$.

Além disto em relação a liberação do espodumênio, mediante a análise de resultados de estudos realizados no laboratório da USP, informou a liberação do espodumênio em torno de $250\mu\text{m}$.

Em relação ao Fe_2O_3 , este apresenta recuperação acima de 60% em todas as faixas, exceto

na faixa de 53 μ m, sendo que não se deseja flotar este óxido. A figura 4.4 mostra também que se deve ter atenção com as partículas finas (<44 μ m), uma vez que podem estar sendo flotadas por arraste mecânico e apresentam teor de Fe₂O₃ consideravelmente alto no concentrado (1,70%). Poderia ocorrer contaminação do concentrado de espodumênio, elevando o teor de Fe₂O₃ para valores acima de 0,8% (fora da especificação do produto). Como também percebe-se uma queda brusca da recuperação do ferro na fração 53 μ m, que neste presente estudo não foi aprofundado as causas deste resultado.

3.7 Equipamentos de flotação

3.7.1 Tank Cell

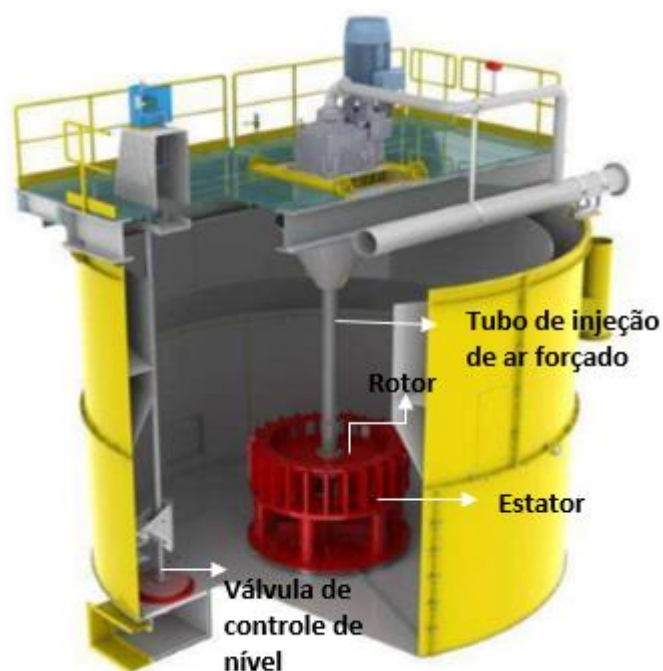
Os *tank cells* (figura 3.15) são máquinas de flotação que utilizam a tecnologia de agitadores e condicionadores para promover a agitação da polpa. Possuem agitação mecânica através de rotores e diferem das células mecânicas convencionais pela possibilidade de alteração do posicionamento dos rotores em função da etapa de flotação realizada, e injeção de ar forçado. Deste modo, permitem um melhor controle e eficiência dos processos de flotação realizados (CHAVES, 2010).

Segundo *Outotec* (2020), as unidades de flotação *Outotec Tank Cell* contém componentes e equipamentos elétricos selecionados para vida operacional. As células são fáceis de operar, apresentam baixo consumo de energia e ar e permitem um layout modular. Possui uma ampla gama de tamanhos de células de até 630 m³. Tem como principais benefícios: menor consumo de energia, layout de planta reduzida, menos equipamentos auxiliares, ótimo desempenho metalúrgico e fácil operação e manutenção.

Para Ganoza (2018), as principais características dos *tank cells* são: alta seletividade, alta recuperação, construção e instalação simples, e operação/controlado simples.

Dentre as principais variáveis de atuação de processo de flotação dos *tank cells* tem-se: nível de camada de espuma/polpa e vazão de ar forçado.

Figura 3.15. Desenho esquemático do *tank cell*.



Fonte: Adaptado de Outotec, 2018.

3.7.2 Célula convencional

As células de flotação convencionais (figura 3.16) consistem em um rotor, no fundo da célula, suspenso por um eixo conectado a um acionamento (fora da célula e acima), girando dentro de um tubo. O rotor tem uma função inicial que é a de manter a polpa agitada e, portanto, em suspensão. O movimento rotacional do rotor gera uma região de pressão negativa dentro da célula. Em muitos modelos, esta depressão é suficiente para aspirar o ar necessário para a flotação, daí a conveniência do tubo coaxial com o eixo do rotor. Em outros casos, o ar é comprimido para dentro da máquina. Para que o ar seja efetivo para carrear para cima o maior número possível de partículas coletadas, deve-se dispor de um grande número de bolhas de pequeno diâmetro. Isto é conseguido colocando, em torno do rotor, uma peça chamada estator, que fragmenta as bolhas de ar (CHAVES&FILHO&BRAGA, 2010).

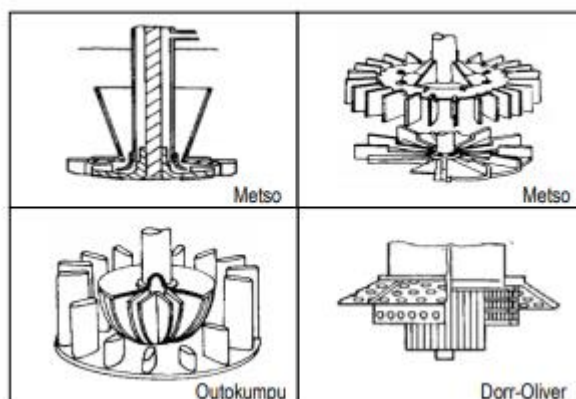
Figura 3.16. Modelo de célula de flotação convencional.



Fonte: Metso, 2015.

As máquinas do modelo descrito são ditas mecânicas e existem vários projetos, diferentes quanto ao formato da célula, do projeto do conjunto rotor-estator e a outros aspectos mecânicos (Yung, 1982). A Figura 3.17 mostra alguns dos desenhos.

Figura 3.17. Desenhos esquemáticos de rotores e estatores



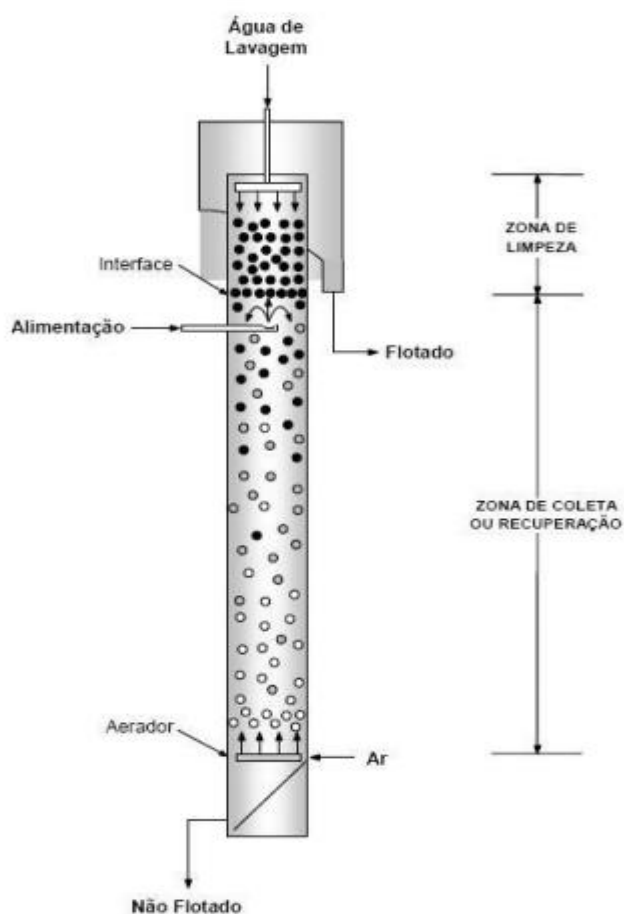
Fonte: Young, 1982, apud Chaves&Filho&Braga, 2010.

3.7.3 Coluna de flotação

Segundo Caldara & Correira (2010), as colunas de flotação (figura 3.18) possuem geralmente entre 9 a 15 metros de altura e 0,5 a 3,0 metros de diâmetro. A seção transversal pode ser quadrada ou circular. A geração de bolhas é obtida diretamente

através de aeradores localizados na parte inferior da coluna (não apresentam rotores). Aeradores são feitos de tubos perfurados revestidos geralmente em tecido ou borracha perfurada. A água de lavagem é adicionada à espuma, geralmente a partir de uma série de tubos perfurados localizados logo abaixo da borda da coluna.

Figura 3.18 Desenho esquemático de coluna de flotação



Fonte: CALDARA & CORREIA, 2010.

3.8 Variáveis na flotação

3.8.1 Granulometria de alimentação

Partículas minerais de tamanhos diferentes são encontradas na polpa durante a flotação. O tamanho da partícula pode variar de décimos de milímetro a micrômetro. Diversos estudos e avaliações em plantas industriais demonstram que a eficiência da flotação de um

mineral depende do tamanho de suas partículas. Logo a análise da faixa granulométrica da flotação é uma importante variável para ser avaliada neste processo de concentração (Glembotskii et al., 1972).

Para LEJA (1982) o tamanho máximo da alimentação para um sistema de flotação pode ser estabelecido em função do tamanho de liberação do mineral útil. Porém, em muitos casos, este tamanho é limitado pela força de adesão entre partícula e bolha.

De maneira geral a granulometria de alimentação da flotação está associada a granulometria de liberação do minério de interesse. Uma vez que, estando o minério liberado e dentro da faixa de trabalho da flotação, se torna ideal a utilização desta granulometria, uma vez que, gastos com moagem elevam muito o custo de energia e de insumos da usina de beneficiamento. LIMA e VALADÃO (2008), estudaram a granulometria de trabalho da flotação e seus estudos mostraram que a flotação pode ser empregada com sucesso para faixas granulométricas entre 10 e 300 μ m. A seletividade do processo de flotação torna-se muito baixa fora desses limites granulométricos, porque as condições hidrodinâmicas do sistema são incapazes de manter o nível de flotabilidade ideal das partículas.

Segundo Trahar (1981), as partículas grossas de diferentes minerais apresentam variações nas porcentagens recuperadas e uma sensibilidade ao meio químico, quando comparadas com as partículas de tamanhos intermediário e fino. Assim sendo, o primeiro indício de uma deficiência de coletor ou ativador ou de um excesso de depressor ou de um pH não adequado ou de alguma outra variável que poderia reduzir a hidrofobicidade do mineral é mostrada pelo decréscimo na taxa de flotação de partículas grossas.

Em relação a granulometria de alimentação da flotação, foi observado por estudos de Klimpel (1988), que maiores dosagens de reagentes coletor eram necessárias para flotar partículas mais grosseiras. Contudo, dosagem em excesso causam efeitos negativos na flotação.

As partículas grosseiras e finas apresentam suas particularidades para serem flotadas,

sendo que algumas condições de aeração, agitação, dosagens de reagentes, entre outros, podem ser benéficos para um e não adequados para outro. Sendo este um indicativo de que a separação da flotação em faixas granulométricas é adequada para obtenção de melhores resultados (CRUZ, 2010).

Estudos realizados por Barros *et al.* (2001 apud Cruz, 2010), relataram alterações efetuadas no estágio de concentração da Fosfertil (atual Mosaic Fertilizantes). O fracionamento da flotação do minério friável em circuitos de grossos e de finos, onde foram realizados estudos em escala de laboratório, obteve ganhos de recuperação de 6% após implementado industrialmente. Os autores salientaram que cada faixa granulométrica apresenta suas características e que estas são diferentes daquelas da flotação em conjunto.

3.8.2 Agitação da polpa

A agitação tem a função de manter as partículas em suspensão e promover o contato bolha-mineral. A intensidade da agitação deve ser controlada com cuidado para evitar perdas. Uma agitação baixa provoca a sedimentação de partículas, por outro lado, uma agitação excessiva provoca o rompimento do agregado bolha-partícula antes deste atingir o transbordo da célula e, como consequência, diminui a eficiência do processo.

Na célula convencional o sistema de agitação é constituído por um motor que aciona, por meio de correias, um tubo vertical oco que termina com uma hélice (impulsor). As células de flotação possuem uma grande variedade de modelos de hélices possibilitando a geração de diferentes sistemas hidrodinâmicos.

As células/*tank cells* operam no seu interior em regime turbulento na região inferior, no qual devem ocorrer os choques bolha-partícula e, em regime laminar, na parte superior, na qual não deve haver perturbações que possam ameaçar a integridade dos agregados (SAMPAIO; BALTAR, 2007).

Nas colunas de flotação, não há um aparato mecânico gerando a agitação. O material

alimentado é circulado na própria coluna devido a um movimento contrafluxo das bolhas de ar, evitando assim a sedimentação e promovendo a agitação da polpa.

3.8.3 Condicionamento da polpa

Para que o reagente possa atuar na superfície da partícula mineral, coletando-a, ativando-a ou deprimindo-a, é necessário que se dê um tempo para que as partículas minerais e as moléculas de reagente tenham chance de se contactarem. Esta operação é denominada condicionamento. Na maioria das espécies minerais, o condicionamento é feito com baixa diluição de polpa (alta porcentagem de sólidos), de modo a aumentar a probabilidade de que as gotículas de reagente e as partículas se encontrem. Daí a frequente necessidade de adensar a polpa antes do condicionamento (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

Para Henwood (1994), o efeito de duração (tempo) e energia de condicionamento no processo de condicionamento, foram considerados as mais importantes variáveis mecânicas que afetam a adsorção do coletor e conseqüentemente o desempenho da flotação.

Em estudo feito por Li *et al.* (1993), variando tempos de condicionamento da flotação, foi constatado que o aumento no tempo de condicionamento elevou a recuperação de partículas grosseiras. A justificava do autor, devido à sua inércia, as partículas grossas requerem um maior nível de hidrofobicidade e maior cobertura superficial pelo coletor, a fim de se obter um contato mais firme com as bolhas de ar.

Assim sendo, para que a flotação ocorra de forma eficiente, a etapa de condicionamento é fundamental para promover a interação da polpa com os reagentes necessários para a flotação. Na etapa de condicionamento, a polpa é submetida à permanência, em um determinado intervalo de tempo, em tanques de condicionamento (figura 3.19), com eixos agitadores, promovendo a suspensão da polpa e o contato entre partículas e reagentes. Essa etapa é fundamental para um bom desempenho da flotação. Deficiências nas etapas de condicionamento podem ocasionar baixo rendimento, rejeitos ricos, e baixa recuperação de partículas mais grosseiras.

Figura 3.19. Tanque de condicionamento de polpa.



Fonte: Engendrar, 2015.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para avaliação da influência da granulometria na flotação de espodumênio da AMG-mineração, consistiu essencialmente da análise da recuperação metalúrgica por faixa granulométrica.

Inicialmente foram analisados os produtos da flotação (alimentação, concentrado e rejeito) por faixa granulométrica. Após análise preliminar desses testes, passou-se para a etapa de testes em bancada e industrial.

Foram realizados testes em bancada com o material +149 μ m e -149 μ m, flotados separadamente, visando explorar melhor o comportamento da recuperação final da flotação. Esta faixa foi escolhida mediante análise dos resultados prévios da flotação de espodumênio da AMG-Mineração.

Em escala industrial foram realizados dois testes visando elevar a recuperação das frações +149 μ m, um com aumento da agitação no *tank cell* do primeiro estágio *rougher*, através do aumento do diâmetro do rotor e outro com aumento do tempo de condicionamento com a inserção de mais um tanque de condicionamento.

4.1. Amostras

As amostras para análise granuloquímica (de lítio e ferro) foram separadas nas faixas granulométricas (material retido) de 177 μ m, 149 μ m, 105 μ m, 53 μ m, 44 μ m e < 44 μ m. As amostras foram coletadas, nos locais de alimentação nova, rejeito final e concentrado final, sendo geradas amostras compostas durante o intervalo de coleta de 6 horas, que representa um turno da AMG-mineração.

As coletas das amostras da alimentação da flotação e rejeito da flotação foram realizadas via amostrador automático *Outotec* modelo MSA (figura 4.1).

Figura 4.1. Amostrador metalúrgico multi-estágio (MSA).



Fonte: OUTOTEC, 2016.

Para as amostras de concentrado final foi utilizado o amostrador automático modelo ASA da Outotec, (figura 4.2).

Figura 4.2. Amostrador modelo ASA



Fonte: OUTOTEC,2016.

4.1.1 Análises granuloquímicas

As análises granuloquímicas de lítio e ferro, das amostras coletadas (1 kg /quarteadas), foram realizadas pelo laboratório da AMG-mineração. As análises químicas foram realizadas via equipamento ICP (plasma por acoplamento indutivo) e a análise granulométrica foi feita a úmido por peneiramento, utilizando as faixas granulométricas

selecionadas (177 μ m, 149 μ m, 105 μ m, 53 μ m, 44 μ m e <44 μ m) com tempo de peneiramento já determinado, por estudos anteriores.

4.3 Testes de flotação

Como foi apresentado, nas frações acima de 149 μ m a recuperação metalúrgica da flotação é bem menor se comparada com as demais frações abaixo de 149 μ m. Para melhor entender, e visar melhoria de recuperação metalúrgica desta fração foram realizados novos testes.

4.3.1. Testes em bancada com alimentação da flotação - granulometria (+149 μ m) e (-149 μ m)

Foram realizados testes de flotação em bancada, utilizando a célula de bancada da AMG-Mineração da marca Brastorno (figura 4.3), com configuração de processo conforme a AMG-Mineração utiliza em seus próprios testes e que apresenta similaridade com a planta industrial:

- Tempo de condicionamento: 7 minutos;
- pH: 10;
- Dosagem de reagente coletor ácido graxo: 610g/t;

Etapa *Rougher*:

- RPM: 1500;
- Aeração: 6 litros/minuto;
- Tempo de coleta: 7 minutos;

Etapa *Cleaner*:

- RPM: 1200;
- Aeração: 4 litros/minuto.
- Tempo de coleta: 3 minutos.

Figura 4.3. Célula de bancada da AMG-Mineração.



Fonte: AMG,2020.

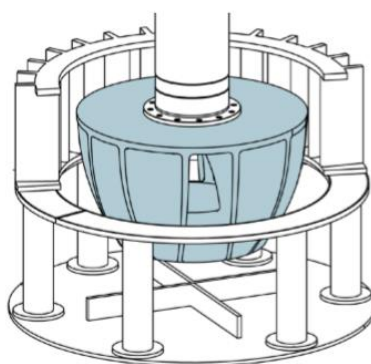
Abaixo é apresentada a sequência de execução dos testes para ambos as faixas granulométricas definidas:

- 1- Coleta de amostra de alimentação da flotação da usina;
- 2- Peneiramento do material em $149\mu\text{m}$;
- 3- Separação do material acima e abaixo de $149\mu\text{m}$;
- 4- Realização de amostragem dos materiais separados para análise química e granulométrica;
- 5- Realização da flotação em bancada com os materiais acima e abaixo de $149\mu\text{m}$, com as respectivas características de processo da usina;
- 6- Realização de amostragem do concentrado final e rejeito final para análise química destes materiais;
- 7- Análise dos resultados;
- 8- Avaliação dos resultados da flotação com granulometria de alimentação dividida em $+149\mu\text{m}$ e $-149\mu\text{m}$, para conhecimento da recuperação final da flotação, após associação dos concentrados.

4.3.3. Teste industrial: elevação da agitação da polpa

Para tentar melhorar a recuperação das frações $+149\mu\text{m}$, foi aumentado o diâmetro do rotor (figura 4.4) do *tank cell* do primeiro estágio *rougher* de 500mm para 650mm, de modo que a agitação da polpa fosse elevada, visando promover uma maior força para que as partículas $+149\mu\text{m}$ fossem destinadas para o *flotado* do *tank cell*.

Figura 4.4. Desenho esquemático do rotor do *tank cell*.



Fonte: Outotec, 2018

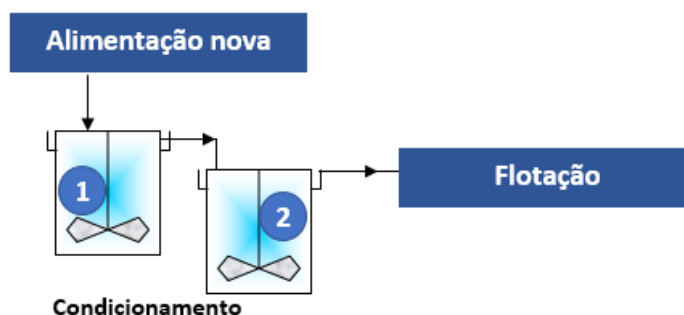
4.3.4 Teste industrial: aumento do tempo de condicionamento

Buscando elevar a recuperação das frações $+149\mu\text{m}$, foi inserido mais um condicionador (2), com as mesmas dimensões e características do primeiro recebendo a polpa do condicionador (1) (figura 4.5), visando aumentar (dobrar) o tempo de condicionamento e promover uma melhor adsorção do reagente coletor com as partículas de espodumênio, principalmente nas partículas $+149\mu\text{m}$.

Dados dos condicionadores:

- Volume: 48 m^3 ;
- Tempo de residência: 17 min;
- % sólidos de trabalho: 33%;
- Tempo de condicionamento com os 2 condicionadores: 34 min.

Figura 4.5. Novo sistema de condicionamento da flotação de espodumênio.



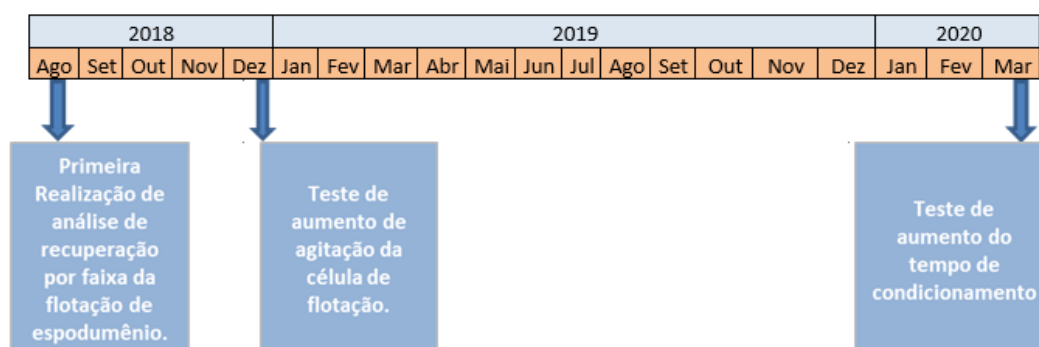
Fonte: próprio autor.

4.3.3 Configuração da flotação para os testes industriais

Para a configuração da flotação em relação a vazão de ar, nível de camada de espuma e dosagem de reagentes, considerou-se os ajustes da equipe de processo para encontrar a especificação do concentrado de espodumênio para venda do produto. Sendo os ajustes de rotina para adequação de teor no concentrado e maximização de recuperação do circuito.

Em relação ao período de realização dos testes, a figura 4.7, demonstra o intervalo em que ocorreram os testes. Eles ocorreram em meses diferentes devido a necessidade de preparação da planta, troca de rotor do *tank cell rougher* e implantação de novo tanque de condicionamento.

Figura 4.7. Linha do tempo da execução dos testes industriais.



Fonte: próprio autor.

Embora os testes tenham sido em meses diferentes, foi mantido a especificação química da alimentação da flotação de $>1,0\%$ de lítio e $<0,5\%$ de ferro.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados testes de bancada

5.1.1 Teste flotação material +149 μ m

Na tabela V.1, apresenta-se os valores de recuperação do material +149 μ m. Como também foi realizado uma granulométrica das faixas 149 μ m e 177 μ m para melhor avaliação dos resultados, pois eram as faixas que apresentaram menor recuperação na análise prévia realizada.

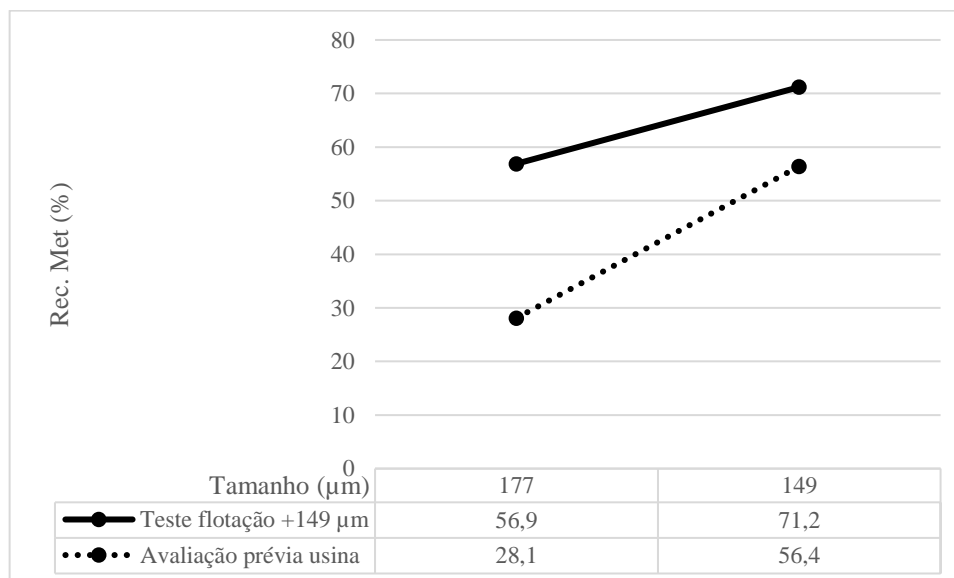
Tabela V.1. Recuperação metalúrgica de material +149 μ m – teste de bancada.

Faixa granulométrica (μ m)	Produto	Retido simples (%)	Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Teor Li ₂ O (%)	Recuperação metalúrgica Fe ₂ O ₃ (%)	Recuperação metalúrgica Li ₂ O(%)
177	Alimentação	71,6	0,5	0,9	100,0	100,0
	Concentrado	49,7	0,9	5,5	29,2	56,9
	Rejeito	67,0	0,4	0,4	70,8	43,1
149	Alimentação	28,4	0,2	1,2	100,0	100,0
	Concentrado	50,3	0,7	5,9	43,4	71,2
	Rejeito	33,0	0,2	0,4	56,6	28,8
Amostra total	Alimentação		0,4	1,0	100,0	100,0
	Concentrado		0,8	5,7	36,0	62,0
	Rejeito		0,3	0,4	64,0	38,0

Fonte: próprio autor.

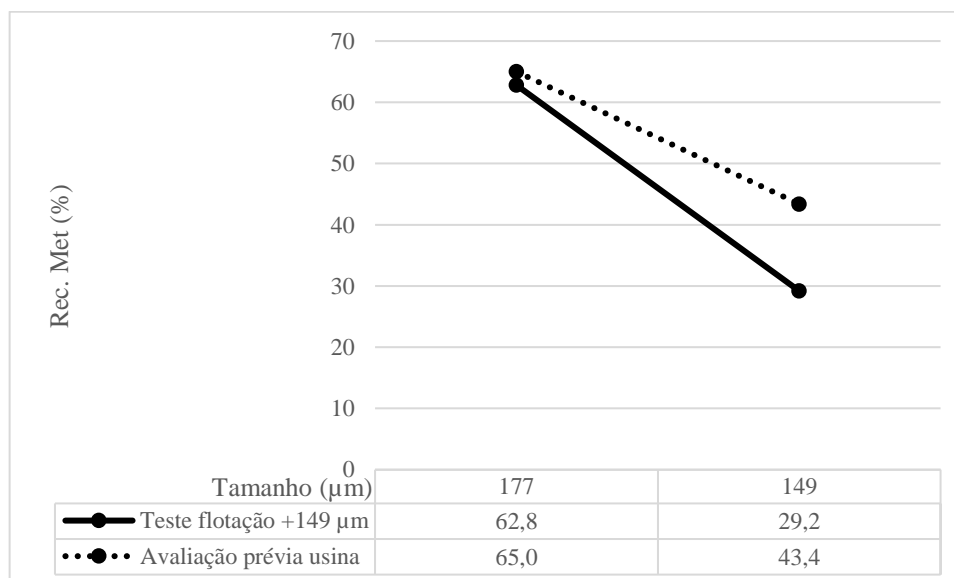
Os resultados dos testes demonstraram que a flotação com somente material acima de 149 μ m apresentou uma recuperação total de 62% de lítio e de 36% de ferro. Como também um incremento de recuperação metalúrgica das faixas 177 μ m e 149 μ m em relação ao lítio e uma redução da recuperação metalúrgica em relação ao ferro, se comparado com o valor encontrado na avaliação prévia realizado na usina (figuras 5.1 e 5.2).

Figura 5.1 Comparativo recuperação do lítio: avaliação prévia da usina x flotação em bancada material +149 μm .



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.2 Comparativo recuperação do ferro: avaliação prévia da usina x flotação em bancada material +149 μm .



Fonte: próprio autor.

5.1.2 Teste de flotação material -149 μm

A tabela V.2 apresenta os dados da recuperação metalúrgica do material -149 μm .

Tabela V.2. Recuperação metalúrgica com material – 149 μm – teste de bancada

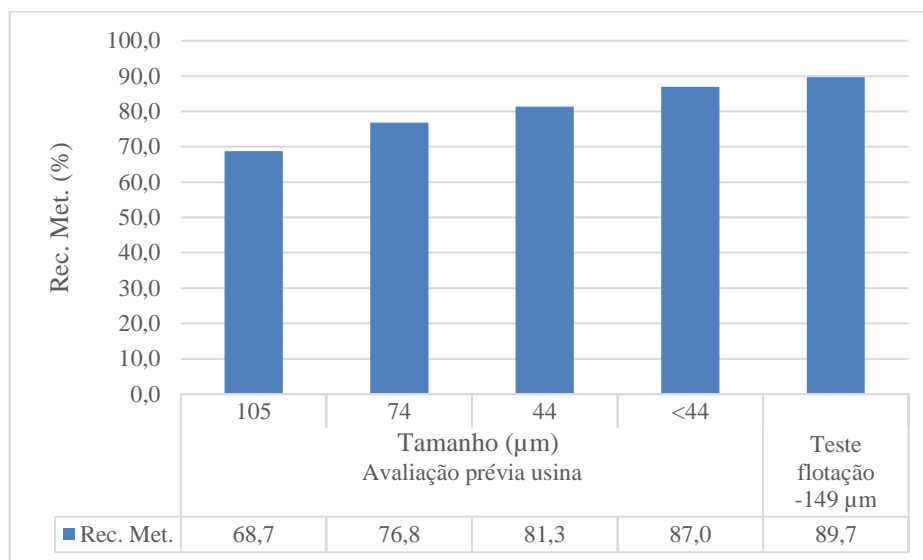
Produto	Teor Fe₂O₃ (%)	Teor Li₂O (%)	Recuperação metalúrgica Fe₂O₃(%)	Recuperação metalúrgica Li₂O(%)
Alimentação	0,41	1,30	100,0	100,0
Concentrado	0,99	3,94	77,9	89,7
Rejeito	0,13	0,19	22,1	10,3

Fonte: próprio autor.

Percebe-se que houve um aumento na recuperação metalúrgica de lítio (89,7%) e ferro (77,9%) se comparado com a avaliação prévia da usina nas faixas granulométricas abaixo de 149 μm (figuras 5.3 e 5.4). Contudo, devido a menor granulometria verificou-se que, mais partículas foram deslocadas para o flotado, de modo que o concentrado final apresentou teor de lítio de 3,94%, o que é bem abaixo da especificação de 5,5%.

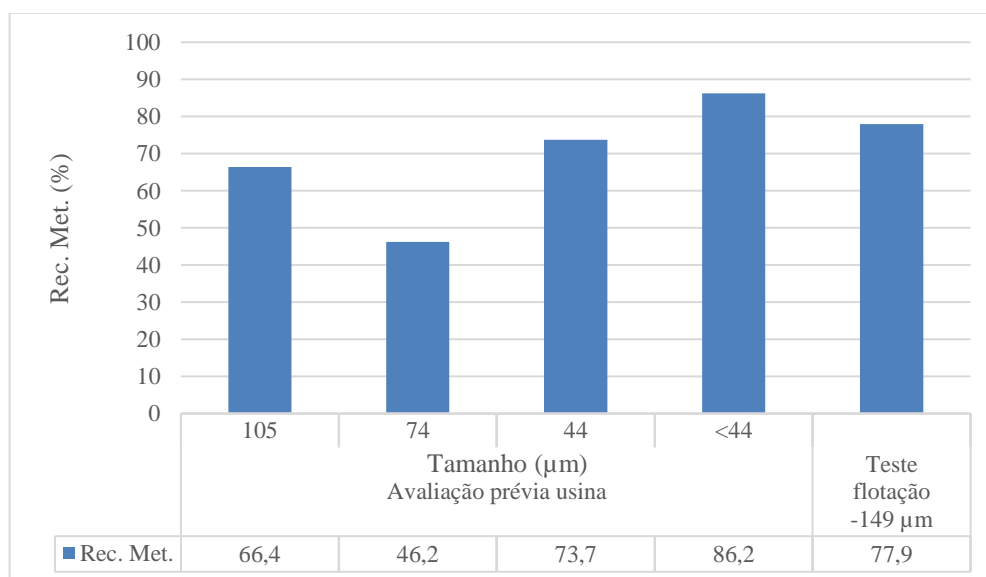
Sendo assim, pode-se dizer que para ajustar o teor do concentrado, a recuperação metalúrgica provavelmente será reduzida, de modo a tornar a flotação mais seletiva para o minério de lítio, com a menor presença de contaminantes no concentrado final.

Figura 5.3 Comparativo recuperação do lítio: Avaliação prévia da usina x flotação em bancada material -149 μm .



Fonte: próprio autor.

Figura 5.4 Comparativo recuperação do ferro: Avaliação prévia da usina x flotação em bancada material -149 μm .



Fonte: próprio autor.

5.1.3 Recuperação global com material +149 μm e -149 μm

Observa-se na tabela V.3 os dados da recuperação metalúrgica final, associando os

valores da recuperação dos materiais + 149 μ m e - 149 μ m.

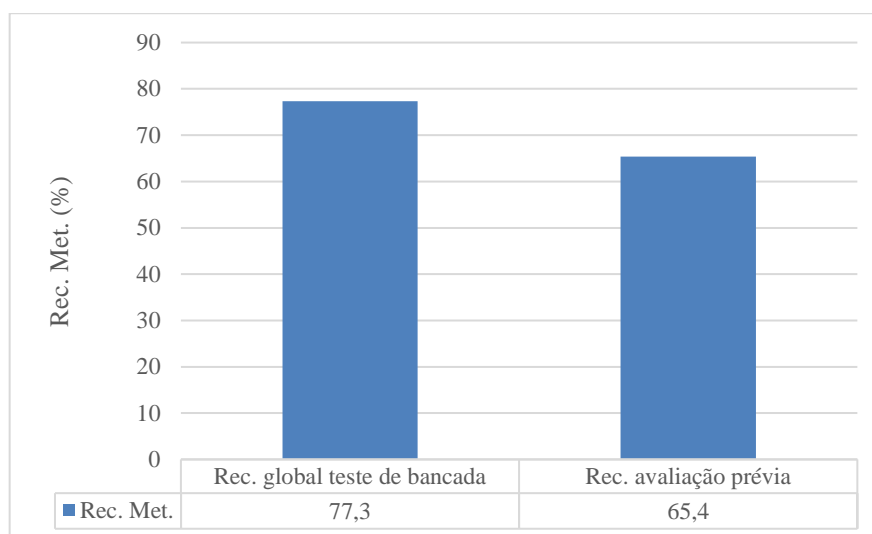
Tabela V.3 Recuperação metalúrgica global – teste de bancada.

Produtos	Fe₂O₃ (%)	Li₂O (%)	Massa (g)	Fe₂O₃ contido (g)	Li₂O contido (g)
Alim. +149μm	0,4	1,0	1734,3	682,5	1695,6
Alim.-149μm	0,4	1,3	1732,8	713,9	2252,6
Alim. total	0,4	1,1	3467,1	1396,4	3948,2
Conc.+149μm	0,8	5,7	165,6	136,6	944,4
Conc.-149μm	1,0	3,9	521,7	515,4	2055,5
Conc. Final	1,0	4,3	687,3	651,8	2999,9
Rej. +149μm	0,3	0,4	1568,7	477,3	652,7
Rej. -149μm	0,1	0,2	1083,8	146,0	205,9
Rej. Final	0,2	0,3	2652,5	623,3	858,6
Rec. Met. Final (%)	55,4	77,3			

Fonte: próprio autor.

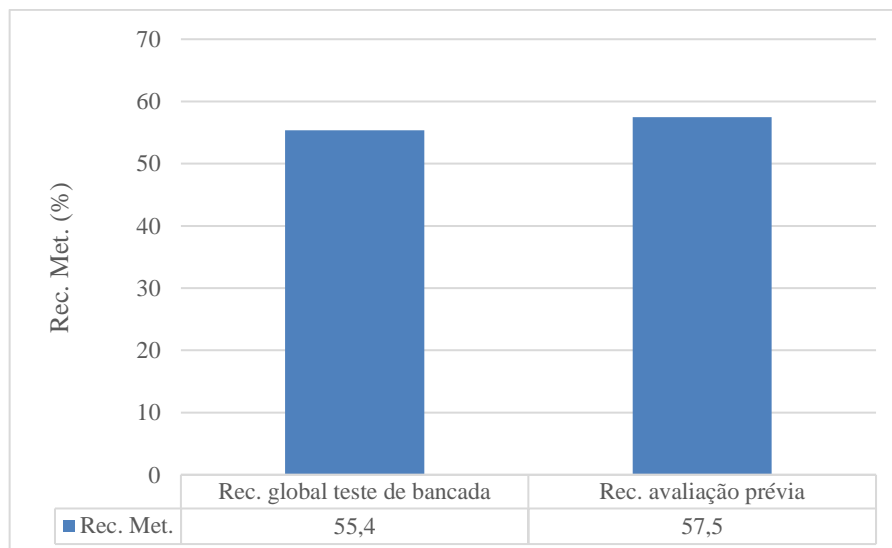
Após associados os valores de recuperação metalúrgica da flotação dos materiais +149 μ m e -149 μ m (figuras 5.5 e 5.6), percebe-se um valor de recuperação de lítio (77,3%) maior em comparação a avaliação prévia realizada na usina (65,4%). Em relação ao ferro o valor apresentou uma ligeira redução (55,4% e 57,5%).

Figura 5.5 Comparativo recuperação metalúrgica global do lítio: Avaliação prévia da usina x flotação em bancada.



Fonte: próprio autor.

Figura 5.6 Comparativo recuperação metalúrgica global do ferro: Avaliação prévia da usina x flotação em bancada.



Fonte: próprio autor.

Vale ressaltar que o teor de concentrado final obtido no teste de bancada foi de 4,3%, menor que a avaliação prévia da usina (4,9%). O que implica que, para ajuste de teor esta recuperação metalúrgica provavelmente seja reduzida.

5.2 Testes industriais

5.2.1 Teste na usina de concentrado de espodumênio - elevação da agitação de polpa

Na tabela V.4 observa-se as informações da avaliação realizada após elevação da agitação de polpa do *tank cell rougher* (mediante o aumento do diâmetro do rotor), da alimentação, concentrado e rejeito.

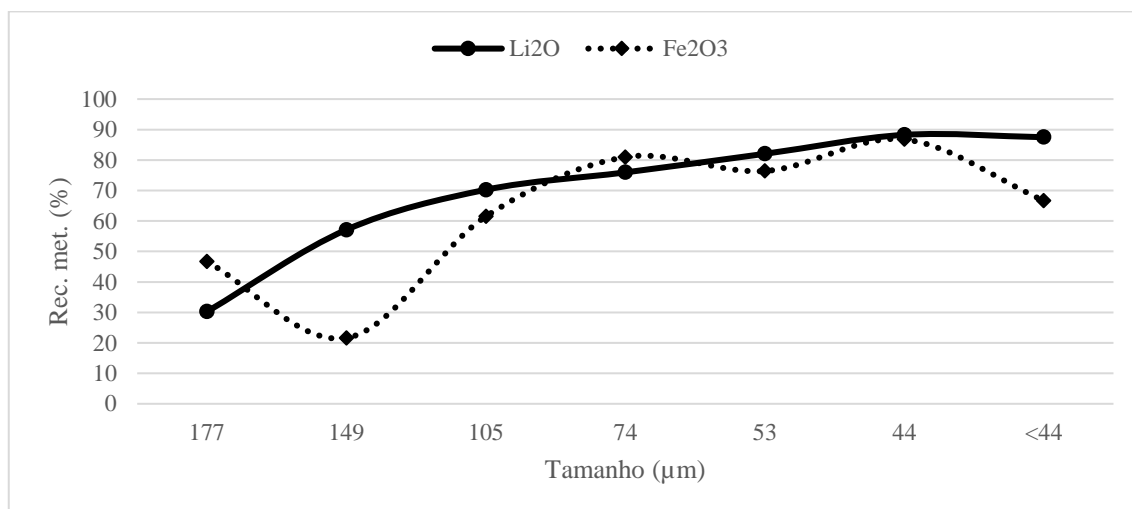
Tabela V.4. Recuperação metalúrgica por faixa - elevação da agitação da polpa.

Faixa granulométrica (µm)	Produto	Retido simples (%)	Teor Fe ₂ O ₃ (%)	Teor Li ₂ O (%)	Recuperação metalúrgica Fe ₂ O ₃ (%)	Recuperação metalúrgica Li ₂ O(%)
177	Alimentação	21,5	0,3	0,5	0,0	100,0
	Concentrado	2,0	0,4	6,4	46,7	30,2
	Rejeito	21,9	0,2	0,4	53,3	69,8
149	Alimentação	11,4	0,2	0,9	0,0	100,0
	Concentrado	3,5	2,2	6,4	21,6	57,1
	Rejeito	11,9	0,2	0,4	78,4	42,9
105	Alimentação	20,6	0,2	1,3	0,0	100,0
	Concentrado	14,7	0,5	6,5	61,5	70,2
	Rejeito	22,4	0,1	0,4	38,5	29,8
74	Alimentação	11,8	0,4	1,5	0,0	100,0
	Concentrado	12,9	0,5	6,6	81,0	75,9
	Rejeito	11,8	0,2	0,5	19,0	24,1
53	Alimentação	11,2	0,4	1,7	0,0	100,0
	Concentrado	17,8	0,6	6,3	76,4	82,0
	Rejeito	11,9	0,2	0,4	23,6	18,0
44	Alimentação	6,0	0,6	1,6	0,0	100,0
	Concentrado	11,1	0,7	5,4	86,8	88,3
	Rejeito	5,5	0,3	0,3	13,2	11,7
<44	Alimentação	17,5	1,1	1,4	0,0	100,0
	Concentrado	37,9	1,5	4,1	66,7	87,5
	Rejeito	14,7	0,7	0,3	33,3	12,5
Amostra Total	Alimentação		0,4	1,2	0,0	100,0
	Concentrado		1,0	5,6	57,5	68,1
	Rejeito		0,2	0,4	42,5	31,9

Fonte: próprio autor.

Após tratamento dos dados, obteve-se a figura 5.7, sendo a curva de recuperação por faixa granulometria após elevação da agitação.

Figura 5.7. Recuperação metalúrgica por faixa de lítio e ferro - elevação da agitação da polpa do *tank cell rougher*.



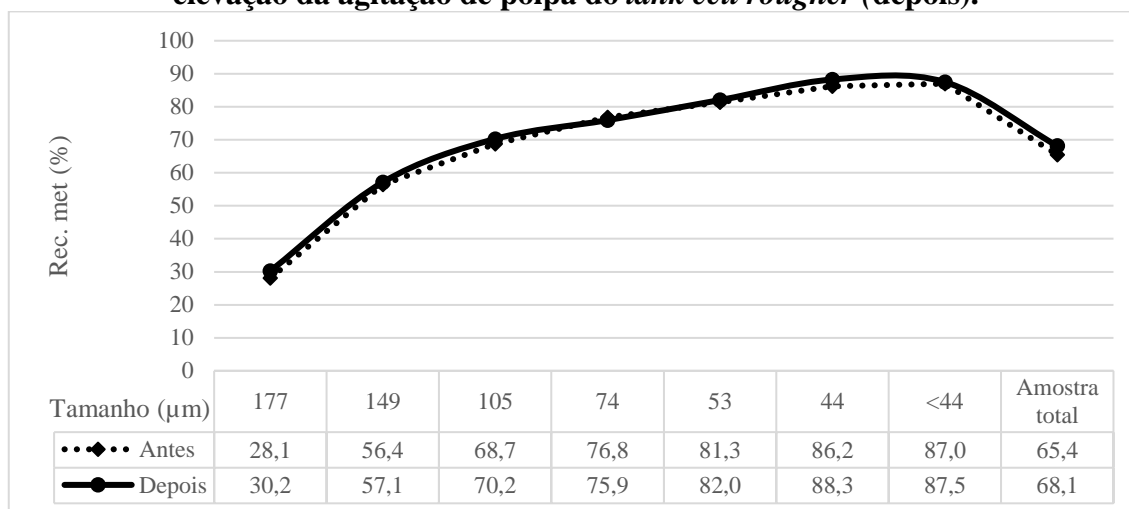
Fonte: próprio autor.

Percebe-se que mesmo com a elevação da agitação do *tank cell rougher*, as frações granulométricas +149μm ainda permanecem com menor recuperação metalúrgica em comparação as demais frações granulométricas.

5.2.2 Análise e comparação dos resultados – agitação de polpa

Na figura 5.8, apresenta uma comparação da recuperação metalúrgica por faixa do lítio antes e após a elevação da agitação da polpa.

Figura 5.8. Recuperação metalúrgica de lítio. Avaliação prévia da usina (antes) x elevação da agitação de polpa do *tank cell rougher* (depois).



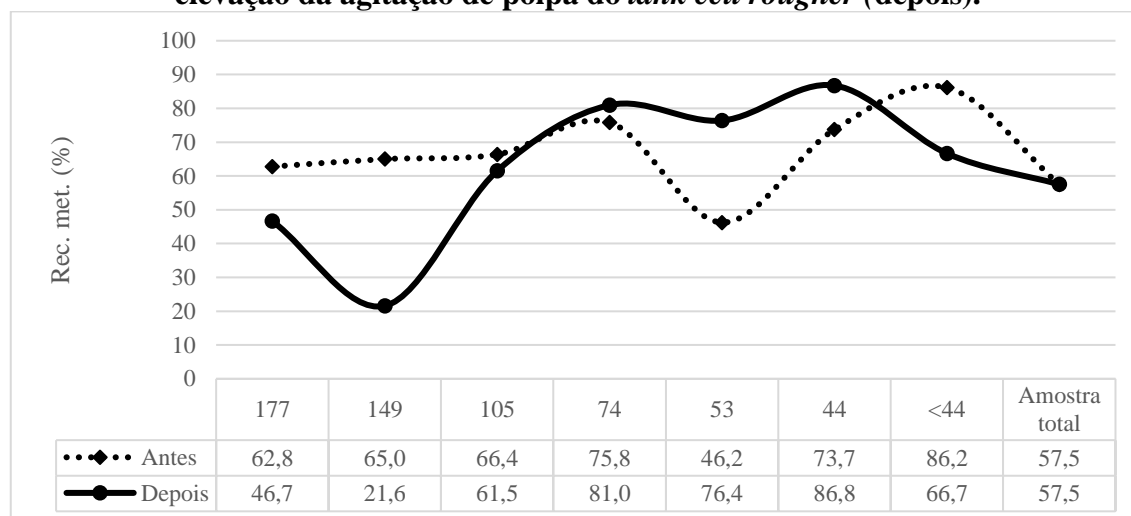
Fonte: próprio autor.

Percebe-se que houve um ligeiro aumento da recuperação de lítio na recuperação global da flotação de 65,4% para 68,1%, como também um pequeno aumento nas frações 177μm de 28% para 30,2% e da fração 149μm de 56,0% para 57,1%. Na fração 74μm, ocorreu uma redução de recuperação de 76,8% para 75,9%.

Assim sendo, pode ser afirmar que a elevação da agitação do *tank cell* etapa *rougher*, trouxe um ligeiro aumento para recuperação metalúrgica global da flotação de 2,7% absolutos.

Em relação a recuperação do ferro, a figura 5.9 demonstra a comparação da recuperação por faixa do ferro antes e após a elevação da agitação.

Figura 5.9. Recuperação metalúrgica de ferro. Avaliação prévia da usina (antes) x elevação da agitação de polpa do *tank cell rougher* (depois).



Fonte: próprio autor.

Em relação a recuperação do ferro, percebe-se que a recuperação metalúrgica global se manteve, contudo, a recuperação do ferro aumentou entre as faixas granulométricas de 74 a 44 μm , e ocorreu redução da recuperação das frações acima de 105 μm . Chama atenção também a redução da recuperação da fração <44 μm de 86,2% para 66,7%.

Vale ressaltar que, como o reagente tipo ácido graxo usado na flotação também ocasiona a recuperação de partículas ricas em ferro, e sendo o teor de ferro um dos critérios na especificação química de venda espodumênio, é muito importante essa avaliação, como também o controle da separação magnética, que é uma das etapas anteriores a flotação, visando reduzir ao máximo o teor de ferro na alimentação da flotação.

5.2.3 Teste na usina de concentrado de espodumênio - aumento do tempo de condicionamento

Na tabela V.5 tem-se os resultados da avaliação realizada após elevação do tempo de condicionamento com a adição de um novo tanque de condicionamento para alimentação, concentrado e rejeito.

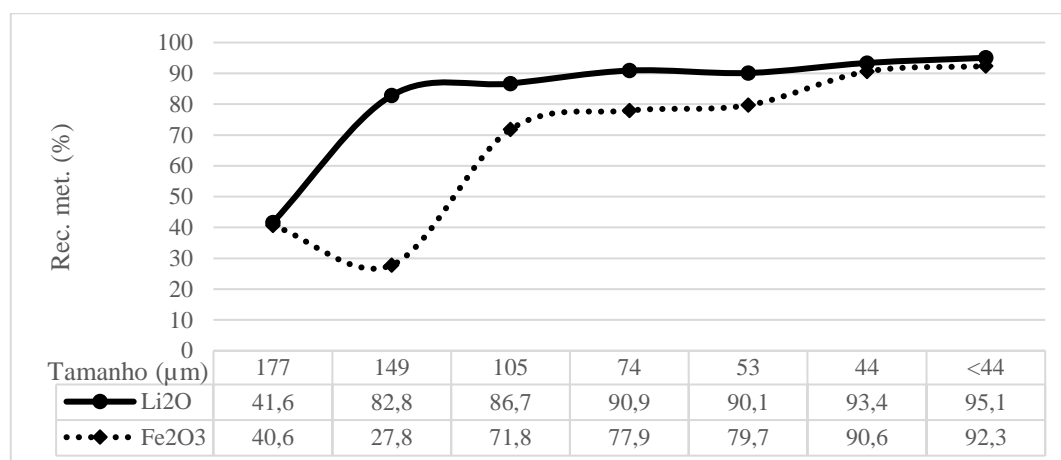
Tabela V.5. Recuperação metalúrgica por faixa – aumento de tempo de condicionamento.

Faixa granulométrica (µm)	Produto	Retido simples (%)	Teor Fe₂O₃ (%)	Teor Li₂O (%)	Recuperação metalúrgica Fe₂O₃(%)	Recuperação metalúrgica Li₂O(%)
177	Alimentação	24,3	0,2	1,2	0,0	100,0
	Concentrado	35,6	0,4	6,0	40,6	41,6
	Rejeito	12,8	0,2	0,8	59,4	58,4
149	Alimentação	12,3	0,1	1,3	0,0	100,0
	Concentrado	15,6	0,4	6,3	27,8	82,8
	Rejeito	8,5	0,1	0,3	72,2	17,2
105	Alimentação	18,5	0,1	1,3	0,0	100,0
	Concentrado	19,2	0,4	5,9	71,8	86,7
	Rejeito	20,6	0,0	0,2	28,2	13,3
74	Alimentação	14,4	0,1	1,3	0,0	100,0
	Concentrado	12,1	0,5	5,2	77,9	90,9
	Rejeito	17,3	0,0	0,2	22,1	9,1
53	Alimentação	12,3	0,2	1,4	0,0	100,0
	Concentrado	8,9	0,6	4,4	79,7	90,1
	Rejeito	17,0	0,1	0,2	20,3	9,9
44	Alimentação	6,2	0,3	1,3	0,0	100,0
	Concentrado	3,7	0,9	3,8	90,6	93,4
	Rejeito	10,9	0,0	0,1	9,4	6,6
<44	Alimentação	12,1	0,5	1,5	0,0	100,0
	Concentrado	4,8	0,9	3,2	92,3	95,1
	Rejeito	13,0	0,1	0,1	7,7	4,9
Amostra Total	Alimentação		0,2	1,3	0,0	100,0
	Concentrado		0,4	5,6	79,8	84,4
	Rejeito		0,1	0,3	20,2	15,6

Fonte: próprio autor.

Após tratamento dos dados, foi gerado a figura 5.10, sendo a curva de recuperação por faixa granulometria após elevação do tempo de condicionamento do coletor.

Figura 5.10. Recuperação metalúrgica de lítio e ferro por faixa granulométrica – após aumento do tempo de condicionamento.

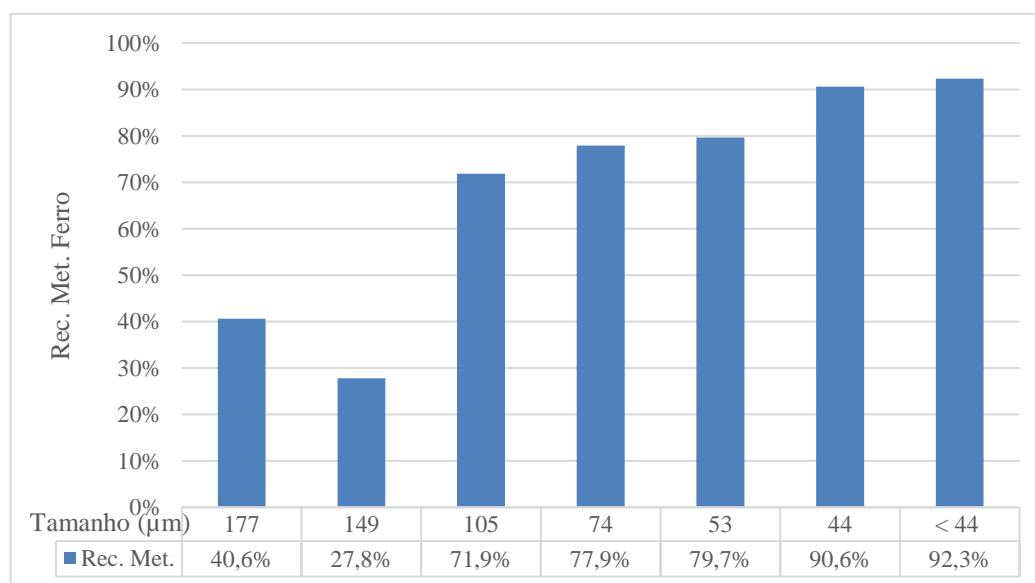


Fonte: próprio autor.

Percebe-se uma elevação nítida da fração 149μm. Entretanto, a fração 177μm, ainda apresentou valores de recuperação menor que as demais frações granulométricas.

Em relação às recuperações das faixas (figura 5.11), com a inserção de maior tempo de condicionamento, a fração de maior recuperação do ferro, consiste na fração <44μm, com 92,34% o que apenas reafirma que a atenção seja na separação magnética ou na moagem.

Figura 5.11. Recuperação metalúrgica de ferro por faixa granulométrica – aumento do tempo de condicionamento.

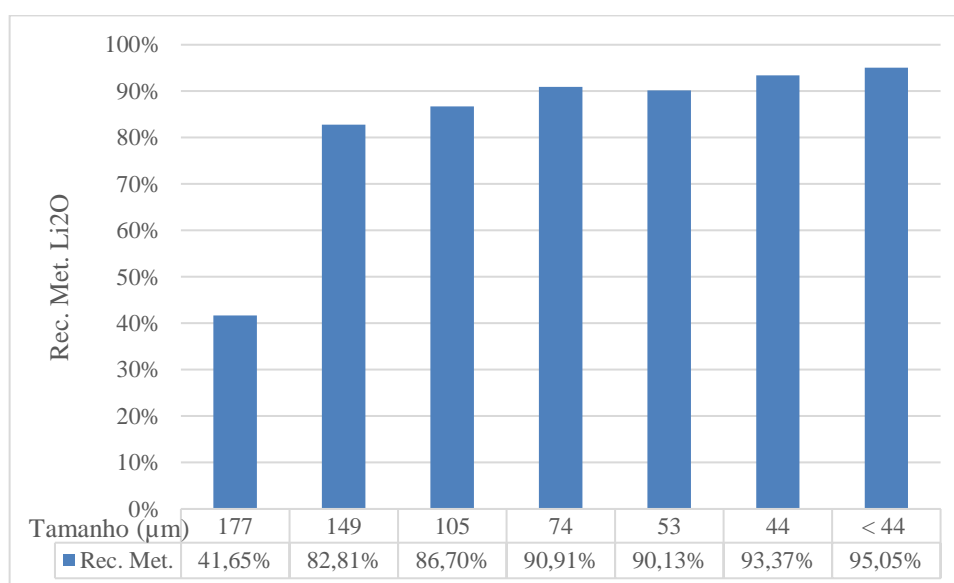


Fonte: próprio autor.

Em uma análise do teor de concentrado em relação a participação da faixa <44 μ m na granulometria de alimentação da flotação, pode-se concluir que quanto menor a participação em massa e teor de ferro desta fração, contribui fortemente para um teor concentrado dentro da especificação de <0,8% de ferro.

Em relação a recuperação metalúrgica das frações de lítio, conforme figura 5.12, pode-se afirmar que, a fração <44 μ m, também é a granulometria que apresenta maior recuperação, com 95,5%.

Figura 5.12. Recuperação metalúrgica de lítio por faixa granulométrica – aumento do tempo de condicionamento.



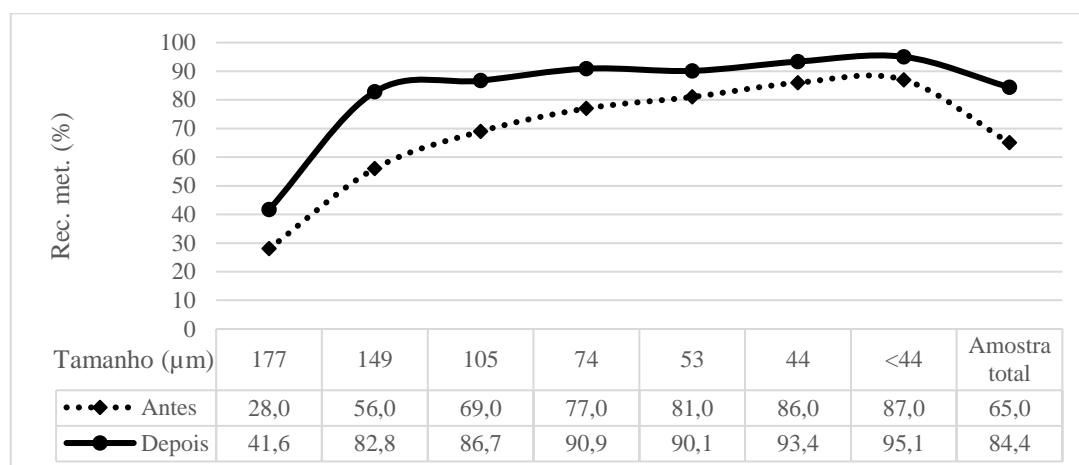
Fonte: próprio autor.

Vale ressaltar que, a fração granulométrica que apresentou menor recuperação metalúrgica foi a 177 μ m. Este é um indicativo de controle, em caso de quedas nas recuperações na usina, pois valores excessivos da participação desta granulometria na alimentação, pode resultar em rejeito com altos teores de lítio e por consequência menores recuperações.

5.2.4 Análise e comparação dos resultados – tempo de condicionamento

A figura 5.13 apresenta uma comparação da recuperação metalúrgica por faixa do lítio antes e após a elevação do tempo de condicionamento do coletor.

Figura 5.13. Recuperação metalúrgica de lítio. Avaliação prévia (antes) x aumento do tempo de condicionamento (depois).

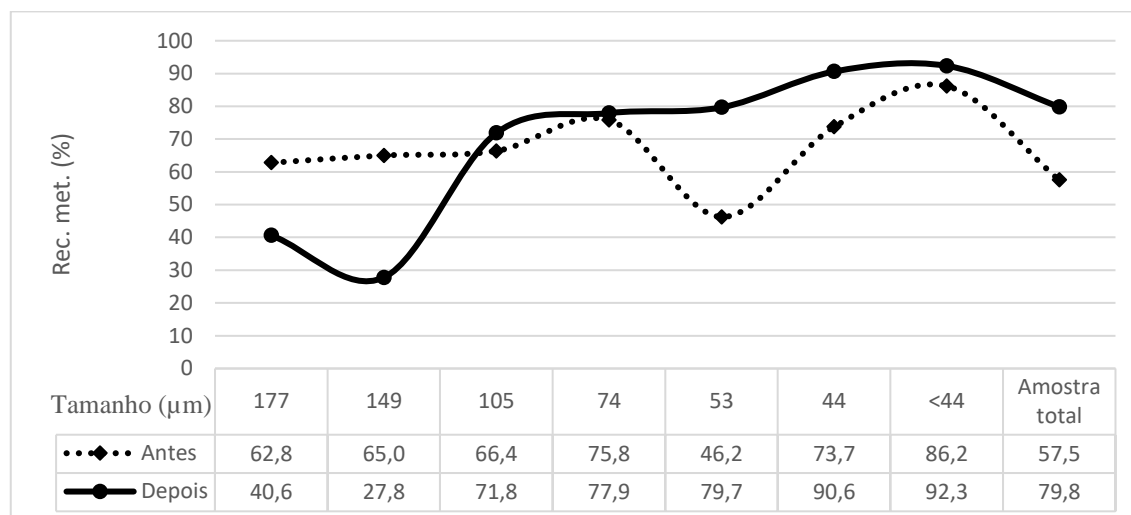


Fonte: próprio autor.

Percebe-se um aumento considerável da flotação de espodumênio, de 65% para 84,4%. Tendo um aumento de 19,4% absolutos na recuperação. Ao analisar todas as faixas granulométrica ocorreu um aumento de recuperação metalúrgica em todas as faixas de recuperação.

Em relação a recuperação do ferro, a figura 5.14 mostra a comparação da recuperação por faixa do ferro antes e após a elevação do tempo de condicionamento.

Figura 5.14. Recuperação metalúrgica de ferro. Avaliação prévia (antes) x aumento do tempo de condicionamento (depois).



Fonte: próprio autor.

Percebe-se que com o aumento do tempo de condicionamento, também houve um aumento da recuperação global do ferro na flotação de 57,5% para 79,8%, sendo um aumento de 22,3% absolutos. Em relação as demais faixas granulometrias todas apresentaram aumento da recuperação, exceto as faixas 177 μm e 149 μm que apresentaram redução.

Chama a atenção a alta recuperação da faixa <44 μm , que se elevou ainda mais, e chegou a 92,3%. Sendo um valor bem expressivo e que indica dois pontos de atenção ao processo para atender a especificação de concentrado:

1. Atenção ao processo de separação magnética de alta intensidade para remoção do máximo de ferro para flotação;
2. Atenção a etapa de moagem para geração partículas <44 μm em excesso, devido a sobre moagem, pois a recuperação desta faixa granulométrica é bem alta na flotação, além de possuir elevado teor de ferro na alimentação.

5.3 Avaliação geral dos testes industriais

Uma análise geral dos testes foi feita, conforme tabelas V.6 e V.7, onde os testes 1, 2 e 3 primeira coluna representam:

- 1- Avaliação prévia de recuperação metalúrgica por faixa;
- 2- Teste de recuperação metalúrgica por faixa após elevação da agitação do *tank cell rougher*;
- 3- Teste de recuperação metalúrgica por faixa após aumento do tempo de condicionamento.

Tabela V.6. Dados resumidos dos teores e recuperação metalúrgica global dos testes industriais.

Testes	Teor Li ₂ O		Teor Fe ₂ O ₃		Rec. Global lítio (%)	Rec. Global ferro (%)
	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Alimentação (%)	Concentrado (%)		
1	1,3	4,9	0,3	1,0	65,0	57,0
2	1,2	5,6	0,4	1,0	68,1	57,5
3	1,3	5,6	0,2	0,5	84,4	79,8

Fonte: próprio autor.

Para o lítio, ao analisar os testes, percebe-se claramente uma expressiva elevação da recuperação do lítio (68,1% para 84,4%) após a inserção do segundo tanque de condicionamento, atingindo a especificação do teor de concentrado em >5,5%.

Para o ferro, após a elevação do tempo de condicionamento a recuperação se elevou bastante, mas em teores de alimentação da flotação na ordem de 0,2% de ferro, o concentrado teve um enriquecimento na ordem de 2,5.

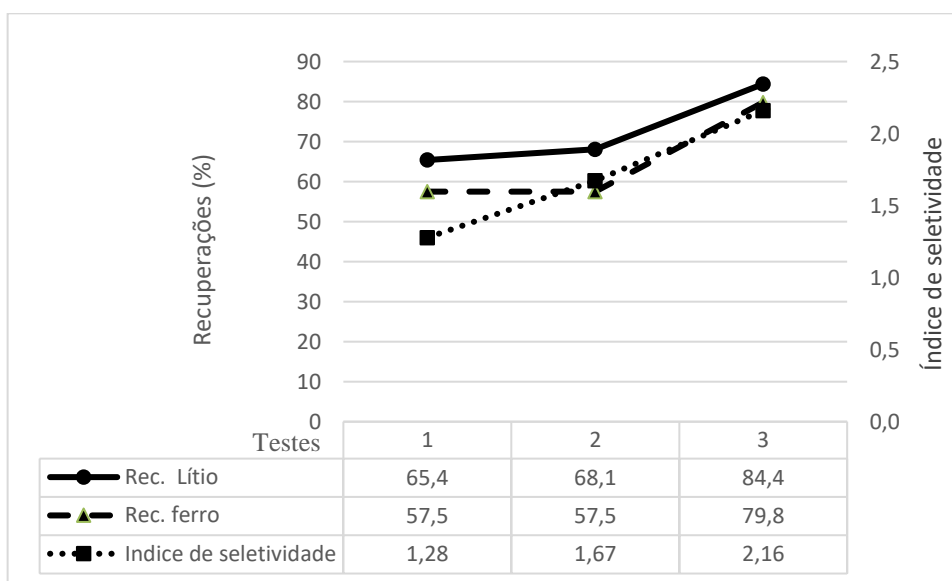
Assim, sendo o condicionamento com o segundo tanque deve ser mantido, pois apresentou maior recuperação metalúrgica e deve-se ajustar o teor de ferro pela separação magnética devido ao aumento também da recuperação do lítio.

O teste 2 (elevação da agitação da polpa no *tank cell rougher*) demonstra que mesmo após esta redução de percentual de alimentação de granulometria $+149\mu\text{m}$, e elevação da agitação, a recuperação metalúrgica global se manteve bem próxima da anterior, com um ligeiro aumento.

O teste 3 (aumento do tempo de condicionamento), mostra que após a elevação do tempo de condicionamento, ocorreu uma elevação expressiva da recuperação na fração $+149\mu\text{m}$ de 57,12% para 82,65%. Na fração $177\mu\text{m}$, ocorreu uma elevação também (30% para 41,65%), contudo em relação as demais faixas granulométricas, são observados valores próximos da metade da recuperação metalúrgica (41,65% versus uma média de $\sim 80\%$ de recuperação da demais frações granulométricas).

Em termos de índice de seletividade em relação ao lítio e ferro, conforme figura 5.15 o teste de aumento de tempo de condicionamento apresentou valor na ordem de 2,16 e o teste de aumento de agitação na ordem de 1,67. Sendo neste caso, com o aumento do tempo de condicionamento ocorre uma flotação mais seletiva também, porém os valores estão próximos e no caso de aumento do tempo condicionamento tanto na recuperação de lítio e ferro obtiveram elevação.

Figura 5.15 Recuperações metalúrgica x índice de seletividade nos testes industriais.



Fonte: próprio autor.

A tabela V.7 apresenta um resumo dos resultados da granulometria de alimentação da flotação e concentrado gerados, uma vez que, é um item que pode ser avaliado nas vendas, objetivando um concentrado mais grosseiro.

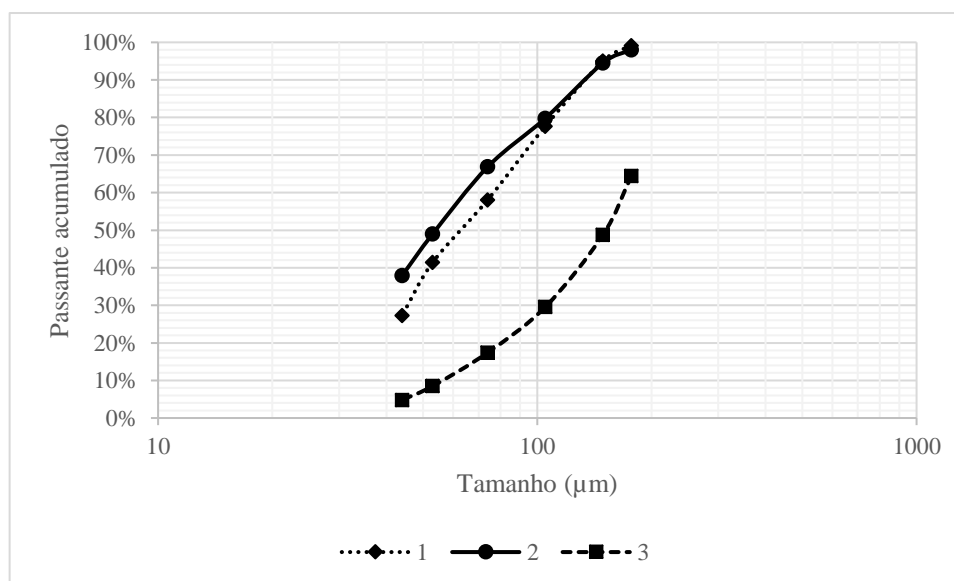
Tabela V.7. Dados resumidos de granulometria dos testes industriais.

Testes	Alimentação	Concentrado
	Retido acumulado + 149 μ m (%)	Retido acumulado + 149 μ m (%)
1	49,40	5,00
2	32,89	5,47
3	36,50	51,23

Fonte: próprio autor.

Pode se afirmar também que, após a inserção do segundo tanque de condicionamento ocorreu uma elevação também de partículas mais grosseiras +149 μ m, no concentrado resultando em uma especificação de concentrado mais grosseiro, representado graficamente pela figura 5.16. Este é um ponto positivo para venda, uma vez que concentrados com excesso de finos é prejudicial ao processo seguinte em planta química.

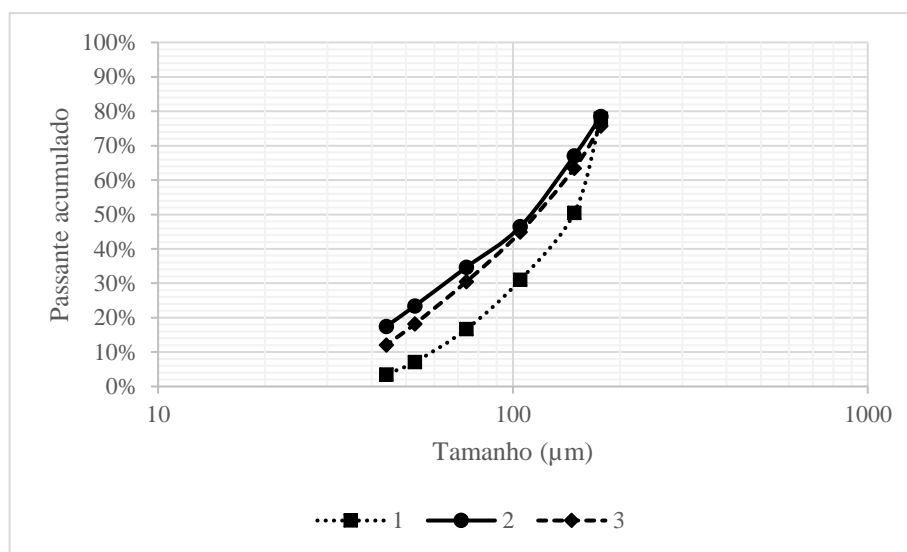
Figura 5.16. Granulometria dos concentrados dos testes industriais.



Fonte: próprio autor.

Em relação a granulometria de alimentação, percebe-se que ocorreu uma redução do % de granulometria de alimentação da flotação de ~50% para ~35% retido em 149 μ m, conforme também figura 5.17. Essa diferença se deve ao distanciamento das datas de realização dos testes e por consequência a alimentação de um material com granulometria diferente ao alimentado inicialmente.

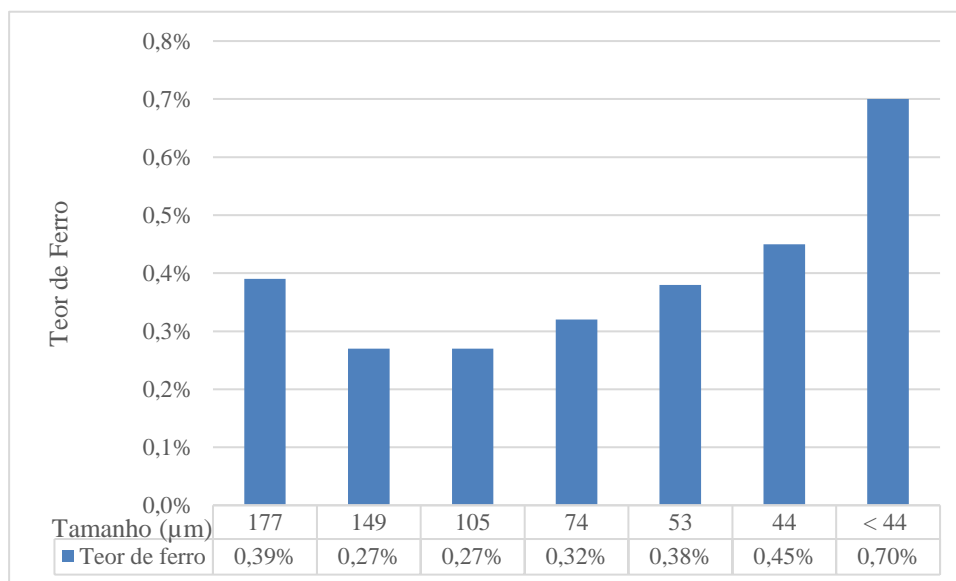
Figura 5.17. Granulometria de alimentação dos testes industriais.



Fonte: próprio autor.

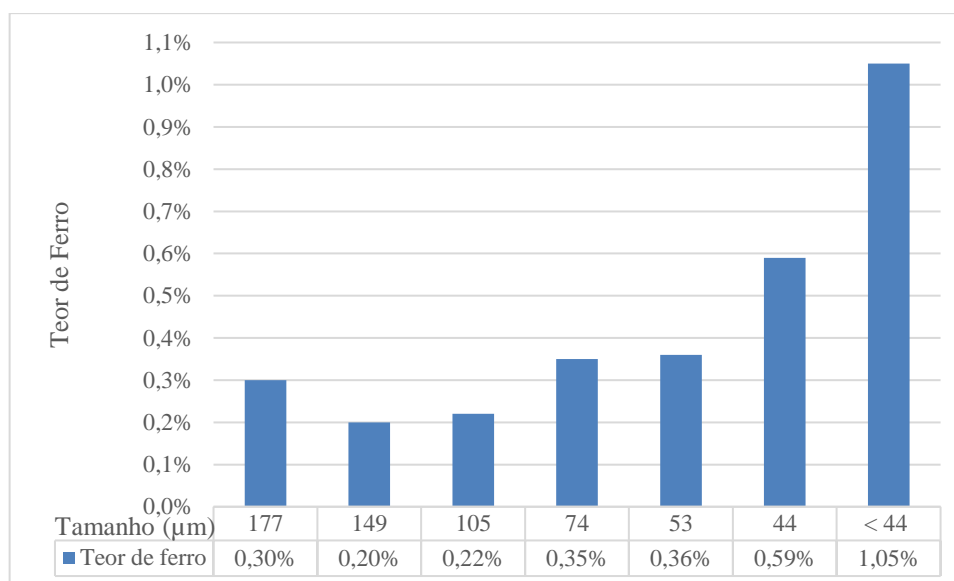
Através dos testes realizados, pode ser ressaltado outro ponto de atenção, por meio das amostras coletadas para análise prévia e testes industriais. Sendo este ponto sobre o teor de ferro na alimentação da flotação conforme observa-se nas figuras 5.18 e 5.19 e 5.20

Figura 5.18. Teor de ferro faixa granulométrica na alimentação – Avaliação prévia



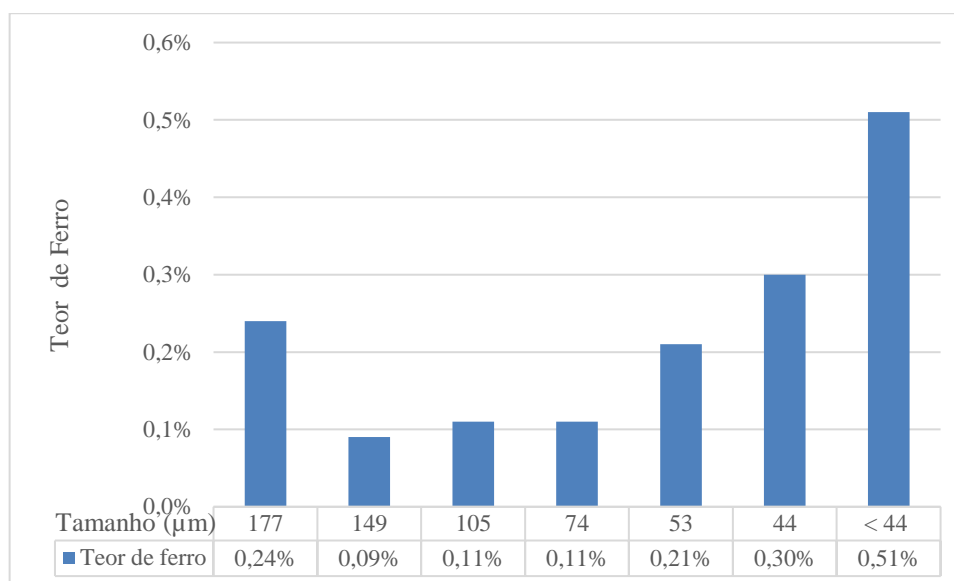
Fonte: próprio autor.

Figura 5.19. Teor de ferro por faixa granulométrica de alimentação – teste elevação de agitação da polpa do *tank cell rougher*.



Fonte: próprio autor.

Figura 5.20. Teor de ferro faixa granulométrica da alimentação – aumento do tempo de condicionamento.



Fonte: próprio autor.

Percebe-se uma crescente elevação do teor de ferro quando a granulometria do minério se tornar mais fina, como também as partículas <44μm apresentam teores muito elevados. Em todos os testes esta faixa granulométrica (<44μm) apresentou teores bem fora da média das outras faixas. Isto indica uma ineficiência da separação magnética, seja por questão de ajuste do equipamento/processo.

5.3.1 Frações granulométricas e recuperações

Em suma pode-se verificar na tabela V.8, um comparativo das recuperações metalúrgicas das frações granulométricas estudadas em relação ao lítio e ao ferro nos testes realizados.

Tabela V.8. Maiores e menores recuperações metalúrgicas das frações granulométricas.

	Maiores recuperações			Menores recuperações	
	Itens	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃
1	Faixa (μm)	<44	<44	177	53
	Recuperação (%)	87,0	86,0	28,0	46,0
2	Faixa (μm)	44	44	177	149
	Recuperação (%)	88,26	86,76	30,24	21,59
3	Faixa (μm)	<44	<44	177	149
	Recuperação (%)	95,05	92,34	41,65	27,78

Fonte: próprio autor.

Em relação ao lítio, a maior recuperação, está na fração <44μm e a menor na fração 177μm. Em todos os testes a fração 177μm apresentou a menor recuperação de lítio. Em relação a fração <44μm no teste elevando a agitação (2) a mesma ficou sendo a segunda maior recuperação metalúrgica, pois a fração 44μm, apresentou valor maior.

Nos testes, em relação ao ferro a fração <44μm também se apresentou como a maior recuperação, exceto no teste 2, com maior agitação do *tank cell rougher*. A fração que apresentou a menor recuperação de ferro é a 149μm, o que difere foi o primeiro teste que estava sendo a fração 53μm.

5.3.2 Comparação da recuperação metalúrgica por faixa granulométrica

Em relação ao lítio, através da tabela V.9 e figura 5.21 podemos comparar o comportamento da recuperação metalúrgica entre as frações granulometrias dos testes.

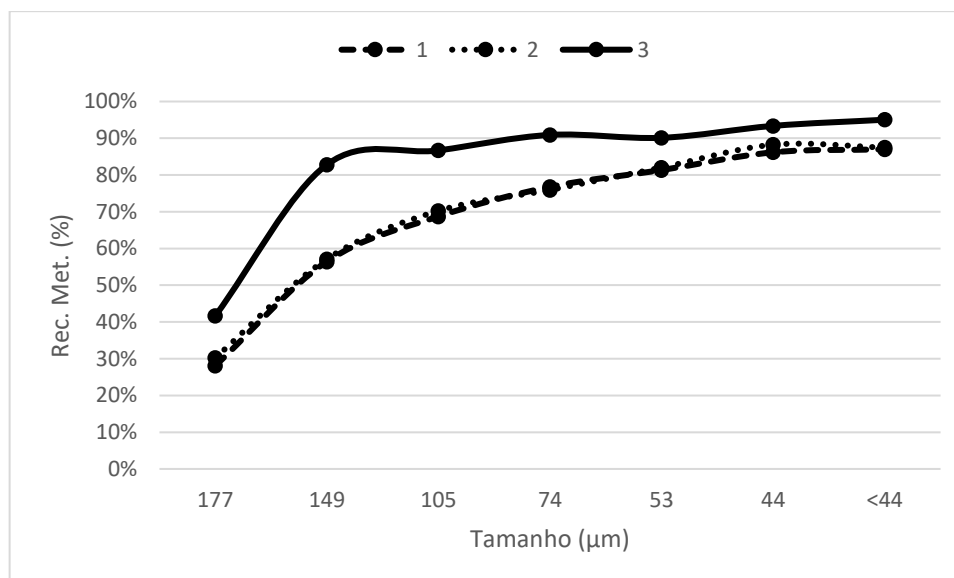
Tabela V.9. Comparativo de recuperação metalúrgica de lítio por faixa granulométrica entre os testes industriais.

Legenda: Redução: ● Aumento: ●

Abertura (μm)	177	149	105	74	53	44	<44	Amostra total
1	28,09% ●	56,44% ●	68,72% ●	76,78% ●	81,34% ●	86,18% ●	86,99% ●	65,43% ●
2	30,24% ●	57,12% ●	70,25% ●	75,94% ●	82,03% ●	88,26% ●	87,49% ●	68,12% ●
3	41,65% ●	82,81% ●	86,70% ●	90,91% ●	90,13% ●	93,37% ●	95,05% ●	84,40% ●

Fonte: próprio autor.

Figura 5.21. Comparativo de recuperação metalúrgica de lítio por faixa granulométrica nos testes industriais.



Fonte: próprio autor.

Em relação ao ferro, através da tabela V.10 e figura 5.22 pode-se comparar o comportamento da recuperação metalúrgica entre as frações granulométrias dos testes.

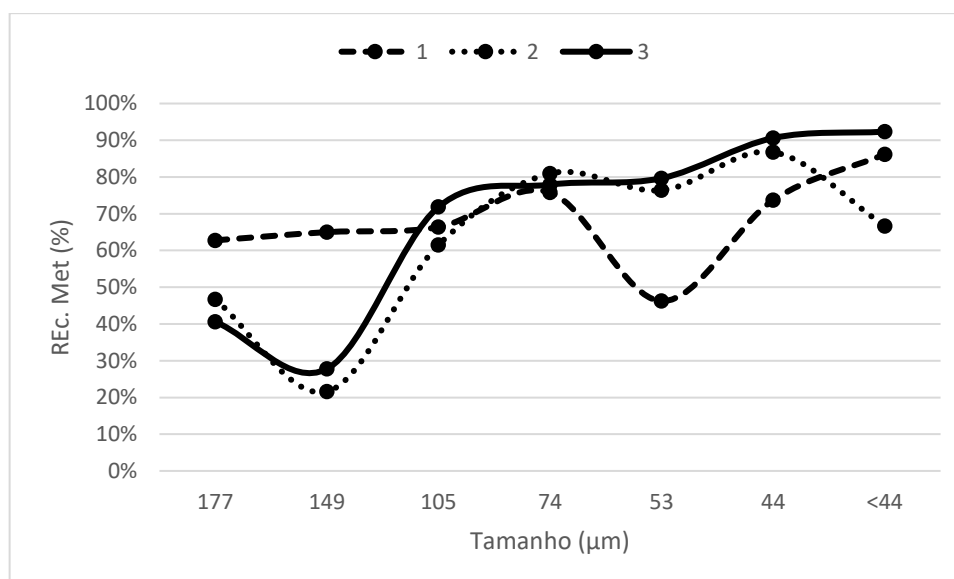
Tabela V.10. Comparativo de recuperação metalúrgica de ferro por faixa granulométrica nos testes industriais.

Legenda: Redução: ● Aumento: ●

Abertura (μm)	177	149	105	74	53	44	<44	Amostra total
1	62,77% ●	65,00% ●	66,37% ●	75,80% ●	46,24% ●	73,72% ●	86,18% ●	57,48% ●
2	46,67% ●	21,59% ●	61,50% ●	80,95% ●	76,39% ●	86,76% ●	66,68% ●	57,52% ●
3	40,63% ●	27,78% ●	71,85% ●	77,92% ●	79,67% ●	90,61% ●	92,34% ●	79,83% ●

Fonte: próprio autor.

Figura 5.22. Comparativo de recuperação metalúrgica de ferro por faixa granulométrica entre os testes industriais.



Fonte: próprio autor.

Pode-se ressaltar que a presença do segundo condicionador, que elevou o tempo de condicionamento, trouxe uma maior recuperação metalúrgica global para flotação em relação ao lítio e ferro. Sendo a primeira de grande contribuição para incremento de

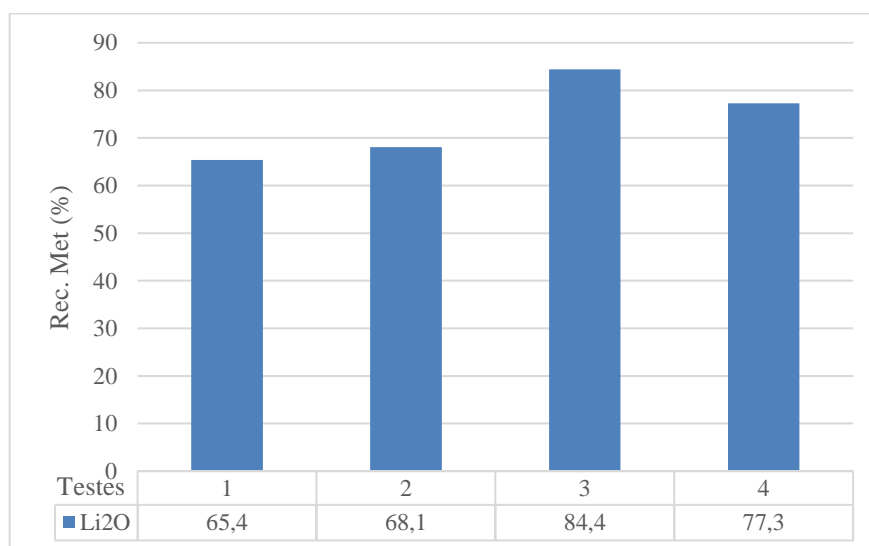
produção e a segunda mesmo com a elevação da recuperação consegue-se obter a especificação do teor de ferro abaixo de 0,8%, contudo é de extrema atenção a etapa de separação magnética para alimentação da flotação com o menor teor possível de ferro, como também controle do teor de ferro advindo do ROM.

5.4 Avaliação geral dos testes de bancada com os testes industriais.

Nas figuras 5.23 e 5.24, é apresentado um comparativo das recuperações metalúrgicas globais obtidos nos testes industriais e teste de bancada para o lítio e o ferro, respectivamente, onde:

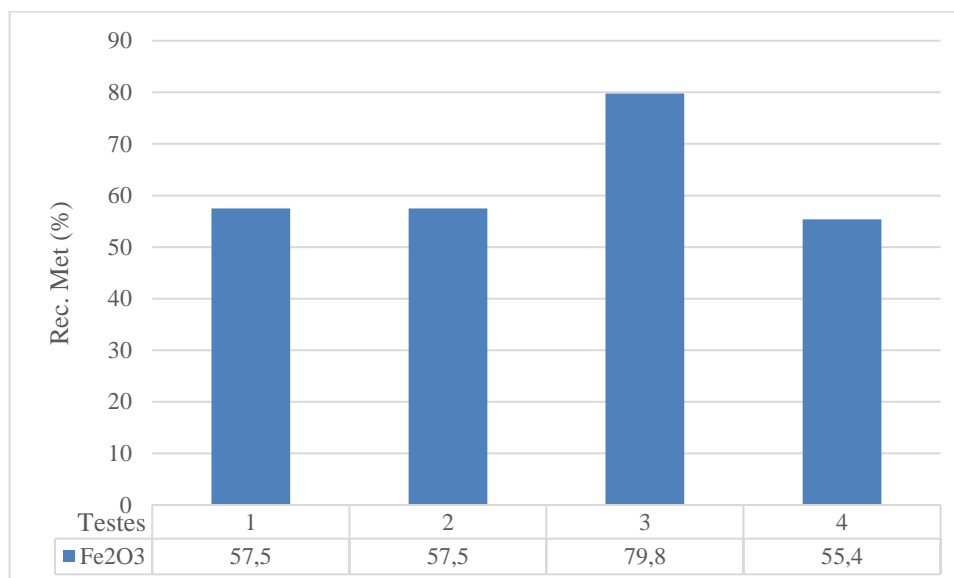
- 1- Avaliação prévia de recuperação por faixa;
- 2- Recuperação metalúrgica após elevação da agitação do *tank cell rougher*;
- 3- Recuperação metalúrgica após elevação do tempo de condicionamento.
- 4- Recuperação metalúrgica com flotação de material +149 μ m e -149 μ m separados.

Figura 5.23. Comparativos de recuperação metalúrgica global de lítio dos testes industriais e teste de bancada.



Fonte: próprio autor.

Figura 5.24. Comparativos de recuperação metalúrgica global de ferro lítio dos testes industriais e teste de bancada.



Fonte: próprio autor.

A maior recuperação metalúrgica global de lítio encontrada foi após o aumento do tempo de condicionamento com a inserção do segundo tanque de condicionamento, seguido pela recuperação em flotação com as frações granulométrica +149 μ m e -149 μ m separadas. Contudo, nesta última deve ser levado em consideração que o teor de concentrado obtido foi abaixo da especificação esperada, sendo necessários realizar ajustes para adequação da mesma, o que pode levar à redução da recuperação metalúrgica global.

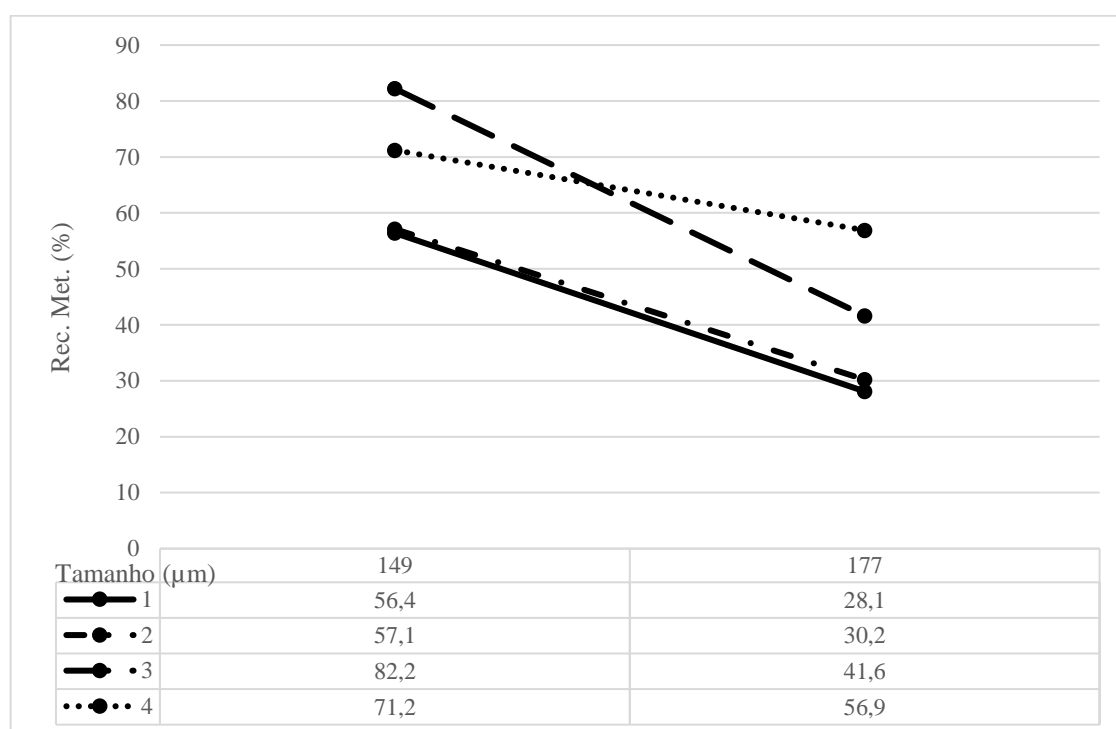
Em relação ao ferro, a recuperação metalúrgica global foi maior também após a inserção do segundo tanque de condicionamento. Como o ferro é um dos contaminantes que é levado em consideração na especificação de venda do concentrado de espodumênio, deve-se ter atenção ao mesmo ao processo.

Em relação ao teste de bancada, a recuperação metalúrgica do ferro, teve um comportamento diferente. Mesmo a recuperação do lítio se elevando bastante, a recuperação do ferro se mantém mais baixa, apresentando um ligeiro aumento em relação à avaliação prévia realizada da usina. Este ponto pode ser melhor explorado futuramente, em caso de teores de ferro do ROM se apresentarem bem elevados, e caso a separação

magnética não tenha capacidade possível para remoção, uma vez que, com a flotação separada nas frações +149 μm e -149 μm tiveram valores de recuperação de ferro mais baixos, com uma recuperação de lítio mais alta. Para isso, novos testes deverão ser feitos para confirmação dos dados e/ou para vislumbrar outros pontos.

Em relação a faixas +149 μm , que apresentou menores recuperação na avaliação prévia realizada, na figura 5.25, segue um comparativo das mesmas nos testes.

Figura 5.25. Recuperação metalúrgica do lítio das faixas granulométricas +149 μm .

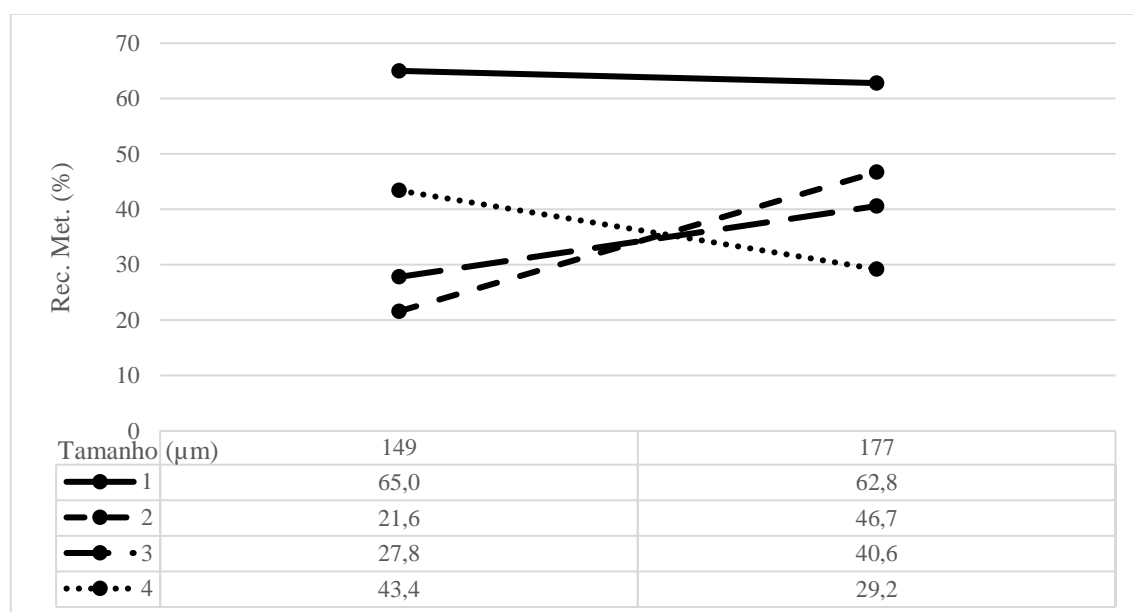


Fonte: próprio autor.

Percebe-se que, a maior recuperação da faixa 149 μm foi com a inserção do segundo tanque de condicionamento e a maior recuperação da faixa 177 μm foi obtida através da flotação em bancada com as frações +149 μm e -149 μm flotadas em separados. O ponto de atenção que ainda permanece é na fração 177 μm , mesmo tendo se elevado em comparação à avaliação prévia realizada da usina, ainda apresenta recuperação menor que as demais faixas granulométricas.

Em relação ao comportamento do ferro nas frações +149 μm , a figura 5.26, apresenta um comparativo das recuperações metalúrgicas com os testes realizados.

Figura 5.26. Recuperação metalúrgica do ferro das faixas granulométricas +149 μm .



Fonte: próprio autor.

A recuperação metalúrgica do ferro nas frações +149 μm , tiveram uma redução de recuperação dos testes em comparação a avaliação prévia realizada da usina, e a elevação da agitação de polpa do *tank cell rougher* apresentou a menor recuperação da faixa 149 μm .

De modo geral, ao avaliar as recuperações das frações acima de 149 μm , a recuperação do ferro reduziu, o que é bom para atender as especificações. Pode-se dizer que, após os testes realizados, com o aumento do tempo de condicionamento, ter material na faixa entre 177 μm e 149 μm é positivo, pois apresenta uma recuperação de lítio alta, similar as outras faixas, e também uma recuperação de ferro mais baixa.

6. CONCLUSÕES

Em suma o presente estudo, trouxe uma melhor avaliação da granulometria da flotação de espodumênio, como também uma maior recuperação metalúrgica da flotação, resultando em aumento de produção.

Com o aumento do tempo de condicionamento houve aumento da recuperação em ambas as frações +149 μ m e -149 μ m. Logo, a utilização do segundo tanque de condicionamento é fundamental para uma maior recuperação da flotação. No qual, cuidados com teor de ferro devem ser tomadas, mediante uma boa performance da separação magnética (etapa anterior), para que o teor de ferro do concentrado esteja dentro da especificação de vendas.

Cuidados com a fração +177 μ m na alimentação da flotação devem ser tomados, uma vez que representa a fração com menor recuperação metalúrgica. Sendo que em casos de queda de recuperação da flotação na usina este item deve ser melhor avaliado.

Abaixo são apresentadas as conclusões relacionadas a cada objetivo proposto:

- o teor de concentrado de lítio obtido na amostra total da flotação no teste preliminar, realizada por faixas granulométricas, foi de 4,9% para uma especificação de venda de 5,5%;
- no teste preliminar, a baixa recuperação do Li₂O nas faixas granulométricas acima de 149 μ m (<56.4%), representando aproximadamente 50% da massa alimentada na flotação, foi o fator determinante para a sequência de ensaios;
- em relação ao Fe₂O₃, na flotação por faixas granulométricas, este apresenta recuperação acima de 60% em todas as faixas, exceto na faixa de 53 μ m, sendo que não se deseja flotar este óxido. O teor de mercado é 0,8%, ficando abaixo desse valor em todas as faixas exceto nas frações mais finas (44 μ m e <44 μ m), o

que pode contaminar o concentrado de espodumênio, elevando o teor de Fe_2O_3 para valores acima de 0,8% (fora da especificação do produto);

- a flotação com somente material acima de $149\mu\text{m}$ apresentou uma recuperação global de 62% de lítio e de 36% de ferro. Como também um incremento de recuperação metalúrgica das faixas $177\mu\text{m}$ (de 28,1 para 56,9%) e $149\mu\text{m}$ (de 56,4 para 71,2%) em relação ao lítio e uma redução da recuperação metalúrgica em relação ao ferro (de 62,8 para 29,2%) em $177\mu\text{m}$ e (de 65,0 para 43,4%) para $149\mu\text{m}$, comparado com o valor encontrado na avaliação prévia realizado na usina;
- a flotação com somente material abaixo de $149\mu\text{m}$ apresentou um aumento na recuperação metalúrgica de lítio (de 78,5%, em média, para 89,7%) e de ferro (de 68,1%, em média, para 77,9%) se comparado com a avaliação prévia da usina nas faixas granulométricas abaixo de $149\mu\text{m}$. Contudo, devido a menor granulometria, provavelmente por arraste, verificou-se mais partículas no flotado, de modo que o concentrado final apresentou teor de lítio de 3,94%, o que é bem abaixo da especificação de 5,5%;
- após associados os valores de recuperação metalúrgica da flotação dos materiais $+149\mu\text{m}$ e $-149\mu\text{m}$, percebe-se um valor de recuperação de lítio (77,3%), maior em comparação a avaliação prévia realizada na usina (65,4%). Em relação ao ferro o valor apresentou uma ligeira redução (55,4% e 57,5%), porém houve uma queda no teor de lítio de 4,9% para 4,3%;
- a elevação da agitação do *tank cell rougher* na usina, nas frações granulométricas $+149\mu\text{m}$, não trouxe uma melhora significativa a recuperação metalúrgica do lítio em comparação as demais frações granulométricas, porém trouxe um ligeiro aumento para recuperação metalúrgica global da flotação de 2,7% absolutos;
- a elevação da agitação do *tank cell rougher* na usina, em relação a recuperação do ferro, resultou em alterações variadas. A recuperação metalúrgica global do ferro

aumentou entre as faixas granulométricas de 74 a 44 μ m (média de 65,2% para 81,4%), ocorreu redução da recuperação das frações acima de 105 μ m (média de 64,7% para 43,3%) e houve redução da recuperação da fração <44 μ m de 86,2% para 66,7%; porém em termos globais a recuperação de ferro não se alterou mantendo-se em 57,5%;

- A presença do segundo condicionador ao circuito de flotação da usina, fez com que a recuperação metalúrgica do circuito de lítio mudasse de patamar, tomando valores bem mais expressivos, de 65% para 84,4%, atingimento a especificação do teor de concentrado em >5,5%;
- No sistema de condicionamento funcionando com 2 tanques, tem-se uma elevação da recuperação de ferro global, no concentrado de lítio, passando de 57,5% para 79,8%, mas o concentrado ficou dentro do range especificado 0,5% (<0,8%);
- Pela avaliação das recuperações por faixa na usina, é indicado um controle da fração 177 μ m, uma vez que, a mesma apresentou valor bem menor de recuperação em comparação as demais frações granulométricas mesmo após a operação do segundo tanque de condicionamento;
- A maior recuperação metalúrgica global de lítio encontrada comparando-se todos os testes, foi após o aumento do tempo de condicionamento com a inserção do segundo tanque de condicionamento, seguido pela recuperação em flotação com as frações granulométrica +149 μ m e -149 μ m separadas. Contudo, nesta última deve ser levado em consideração que o teor de concentrado obtido foi abaixo da especificação esperada, sendo necessários realizar ajustes para adequação do teor.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados encontrados no presente trabalho indicam que trabalhos futuros devem:

- Realizar testes de flotação em bancada, de modo a moer a fração +149 μ m, para -149 μ m, e associá-lo com o resto do material, para conhecimento da recuperação metalúrgica global da flotação;
- Conduzir mais testes de recuperação por faixa da usina, para maior acompanhamento de processo;
- Realizar testes de bancada com teores de lítio menor que 0,8%, para conhecimento da performance da flotação com teores mais baixos;
- Conduzir testes de recuperação por faixa da flotação, com peneiras de faixas granulométricas acima de 177 μ m para explorar melhor a recuperação deste material.

8. REFERÊNCIAS

AMG, Advanced Metallurgical Group N.V. Projetos AMG na cadeia do Lítio, panorama

atual. Disponível em: www.amg-nv.com. Acesso em 24/11/2019. Setembro 2018, Nazareno/MG.

AMG-MINERAÇÃO. *General process description. Spodumene Plant EPC*. Mina de Volta Grande, Nazareno/MG. Outubro 2017. 20p.

AMG LITHIUM. *Lithium milestones and phases and Lithium project photos*, 2019. Disponível em:< <http://amglithium.com/>>. Acesso em 15/12/2019.

BALTAR, C. A. M. Flotação no tratamento de minério. Departamento de Engenharia de Minas - UFPE, Recife-PE, Brasil, 2008.

BANKS, M. K., MCDANIEL, W. T., SALES, P. N. *A Method for concentration of North Carolina Spodumene Ores*. Mining Engineering.1953.

BRAGA, P.F.A., FRANÇA, S.C.A., CELINO, E.A.B. Lítio, uma visão atualizada do mercado mundial. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Goiânia, 2013.p. 1-8.

BRAGA, P.F.A, FRANÇA, S.C.A. Lítio: um mineral estratégico. Série de estudos e documentos. CETEM/MCTI, 2013.

BRAGA, P.F.A., SAMPAIO, J.A. Lítio. Rochas e Minerais Industriais. Capítulo 26 Centro de Tecnologia Mineral, 2008. Disponível em:< <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1115/1/26.%20LITIO.pdf>>. Acesso em: 15/09/2020.

CALDARA, J.A. CORREIA, J.C.G. Abordagem sobre a aplicação da flotação em coluna em beneficiamento mineral. Iniciação Científica, Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

CBL, Companhia brasileira de lítio. Diagrama de processo de mineração do lítio Disponível em: <<http://cblitio.com.br/mineracao/>>. Acesso em 27/08/2020.

CHAVES, A.P. FILHO, L.S.L. BRAGA, P.F.A. Flotação. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Processos Mineraiis – COPM. Rio de Janeiro, 2010.

CHAVES, M.L.S.C., DIAS, C.H., CARDOSO, D.K.R. Recursos minerais de minas gerais – lítio. CPMTIC-IGC/UFMG.21p. Belo Horizonte.2018.

COMPANHIA BRASILEIRA DE LÍTIO. Conheça a unidade de mineração da CBL. Disponível em: < <http://cblitio.com.br/mineracao/>>. Acesso em 21/09/2020.

CPRM, Serviço geológico do Brasil. Projeto de avaliação do potencial do lítio no brasil. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/impressa/Site/pdf/Clipping/apresentacaolitio.pdf>. Acesso em: 24/11/2019.

CRUZ, M.R. Flotação fracionada: aumento do rendimento da flotação através da divisão da alimentação em duas frações granulométricas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal De Minas Gerais. Curso de pós graduação em engenharia de metalúrgica e de minas. Março 2010.

DNPM, Departamento nacional de produção mineral. Recursos e reservas de lítio (nacional e internacional). III Seminário sobre Lítio – Brasil CETEM/RJ. 16 de agosto de 2018

ENGENDRAR. Condicionador de polpa. Disponível em: < <http://www.engendrar.com.br/site/produtos/?id=12/Condicionador-de-Polpa.html>>. Acesso em: 10/03/2021.

GANOZA, J. *911Metallurgist. Flotation Tank Cell*. 2018. Disponível em: < <https://www.911metallurgist.com/tank-flotation-cells/>>. Acesso em: 24/02/2020.

- GAUDIN, A. M. *Principles of mineral dressing*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1939.
- GLEMBOTSKII, V.A.; KLASSEN, V.I.; PLAKSIN, I.N. *The effect of mineral particle size on flotation In: Flotation*, capítulo 2, p. 230 – 250, 1972.
- HENWOOD, D. *The effect of conditioning on froth flotation. University of Cape Town. Master of science in engineering. Department of Chemical Engineering. South Africa.* 1994.194p.
- JAHNS, R. H. *The study of pegmatites: economic geology. 50th Anniver.* p.1025 1130, 1955.
- KLIMPEL, R.R. *Considerations for improving the performance of froth flotation systems. Mining Engineering*, p.1 093 – 1100, 1988.
- LEJA, J. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. New York: Plenum Press, 1982. 758p
- LI, R.; HOBERG, H.; SCHNEIDER, F.U. *Investigations on the influence of particle size in flotation. In: International Mineral Processing Congress, XVIII, 1993, Sydney. Volume 3*, p. 689 – 697.
- LIMA, N. P, VALADÃO, G. E. *Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. Rem-revista Escola De Minas*, vol 61. Ouro Preto. 2008. 5.
- METSO. Máquina de flotação. Disponível em: <
<https://www.metso.com/br/produtos/maquinas-de-flotacao/equipamento-de-flotacao-convencional-dr/>>. Acesso em 10/03/2021.
- NORRIS, E. *FMC Lithium's view of the lithium market. 4 th Lithium Supply & Markets Conference, Buenos Aires, Argentina, presentation, 20 p., 2012.*
- OUTOTEC. *Melhores práticas de manutenção para garantir a performance metalúrgica*

da flotação. Seminário Outotec – Serviços. Tecnologias na Planta de Espodumênio da AMG Mineração. Nazareno, junho 2018.

OUTOTEC. *Slurry sampling solutions*. Finlândia, 2016.

PINHEIRO, J.C.F. *Ores for the production of a Brazilian lithium ion battery*. Departamento nacional de produção mineral. Núcleo de geoprocessamento SUP/DNPM/CE. Julho de 2011.

PEREIRA, R. M.; RODRIGUES, D.; ÁVILA, C. A.; NEUMANN, R.. Stocks cheider Quartzo-Moscovíticos e Pegmatíticos na Zona de Cúpula do Granitóide Ritápolis, Região de São João Del Rei, Minas Gerais. Anuário do Instituto de Geociência. Rio de Janeiro. V. 34, p 59-69,2011.

PERES, A. E. C., COELHO, E. M., de ARAÚJO, A. C. Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia; In Memorian Prof. Paulo Abib Andery. Recife: ITEPCNPq, p. 205-286. 1980.

PERES, A. E. C. et al. Métodos de concentração. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 6, p. 105-139.

PORPHÍRIO, N.H., BARBOSA, M.I., BERTOLINO, L.C. Caracterização Tecnológica de Minérios Parte I. Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 5ª Edição, capítulo 3, p. 57-84. Rio de Janeiro, 2010.

QUÉMÉNEUR J.J.G.; RIBEIRO A.; TROUW R.A.J.; PACIULLO F.V.P.; HEILBRON M. 2003. Folha SF.23-X-C-I, Lavras, Estado de Minas Gerais, escala 1:100.000. Projeto Sul de Minas. Belo Horizonte: CODEMIG/UFMG/UFRJ/UERJ.

RESUMO DE MERCADORIAS MINERAIS. Levantamento Geológico dos Estados Unidos, 2020. *Lithium*. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-lithium.pdf>>. Acesso em

10/09/2020.

RESOURCES AND ENERGY QUARTERLY. Lithium, 2020. Disponível em: <<https://publications.industry.gov.au/publications/resourcesandenergyquarterlyjune2020/documents/Resources-and-Energy-Quarterly-June-2020-Lithium.pdf>>. Acesso em 15/09/2020.

SAMPAIO, J.A. BALTAR, C. A. M. Ensaio de flotação. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais – CETEM/MCT.2007.

STATISTA. Plataforma de informações de negócios. *Countries with the largest lithium reserves worldwide as of 2019*. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/268790/countries-with-the-largest-lithium-reserves-worldwide/>>. Acesso em 10/09/2020.

STATISTA. Plataforma de informações de negócios. *Major countries in worldwide lithium mine production from 2014 to 2019*. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/268789/countries-with-the-largest-production-output-of-lithium/>> . Acesso em 10/09/2020.

TRAHAR, W.J. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, v. 8, p. 289 – 327, 1981.

UNESP. Espodumênio. Departamento de Petrologia e Metalogenia. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/espodumenio-spodumene/> . Acesso em 24/11/2019. Rio Claro, São Paulo. 2019.

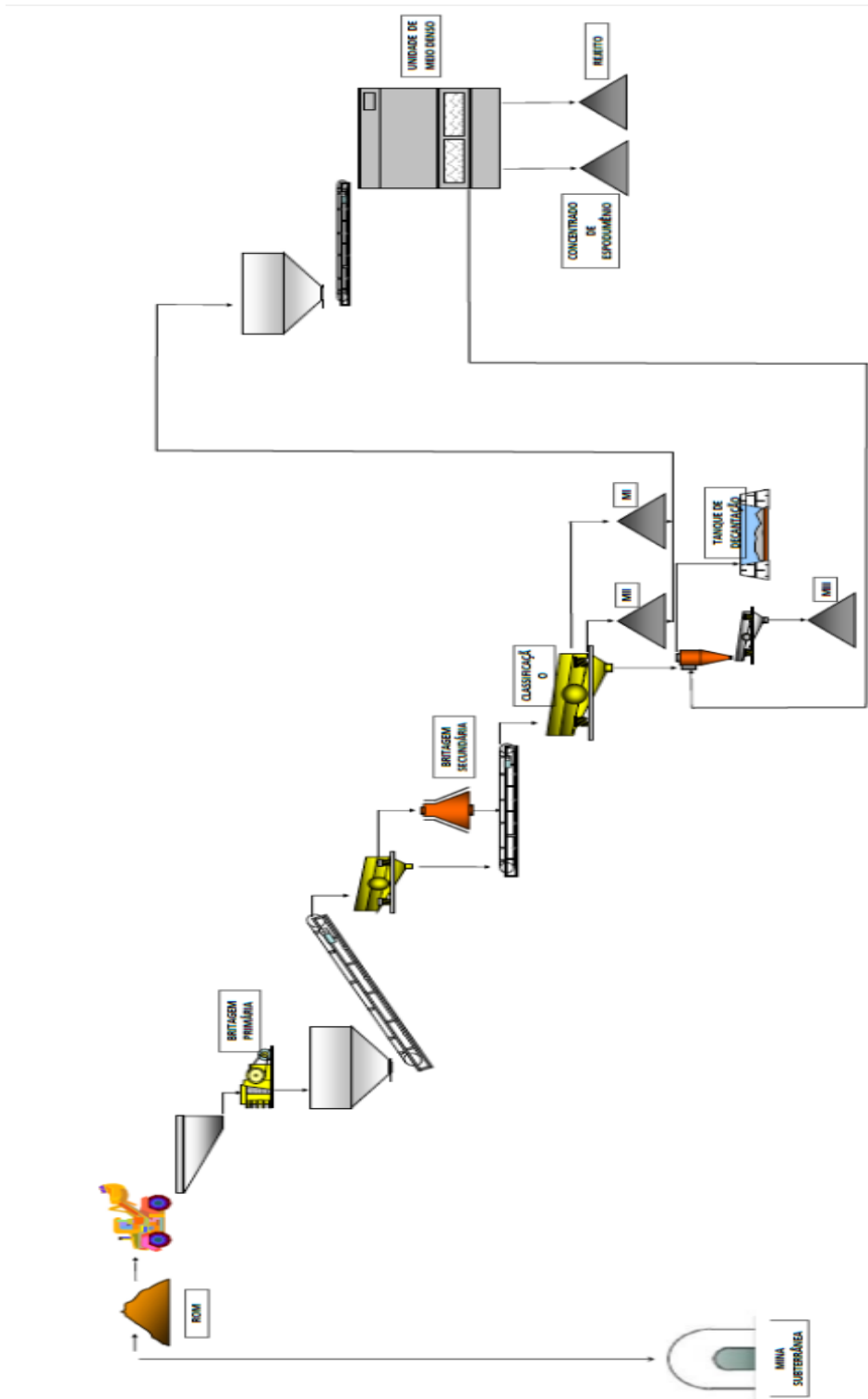
USP. Laboratório de Caracterização Tecnológica. Relatório de caracterização tecnológica do espodumênio da AMG-Mineração. São Paulo, 2018

VIANA, P.R.M. Flotação de espodumênio, microclina, muscovita e quartzo com

coletores aniônicos, catiônicos, anfotéricos e mistura de coletores. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Escola de Engenharia, 2006. 224p.

VIANA, P.R.M. ARAUJO, A.C. PERES, A.E.C. SALUM, M.J.G. Concentração De Silicato De Lítio- uma revisão. Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

VIDAL, F. W. H.; NOGUEIRA N.; ARAÚJO, J. Minerais de Pegmatito. In: VIDAL, Francisco Wilson Hollanda. Rochas e minerais industriais do Ceará. Fortaleza: Realce Editora& Indústria Gráfica Ltda. 2005. p 67-81.

ANEXO I. FLUXOGRAMA CBL**Fluxograma de processo da empresa Companhia brasileira de lítio (CBL).**

Fonte: CBL,2019.