



ARTHUR DE PAULA CARDOSO

**AVALIAÇÃO DE COLETORES PARA A FLOTAÇÃO DE
ESPUMA DO ESPODUMÊNIO**

**LAVRAS – MG
2022**

ARTHUR DE PAULA CARDOSO

**AVALIAÇÃO DE COLETORES PARA A FLOTAÇÃO DE ESPUMA DO
ESPODUMÊNIO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dra. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2022**

ARTHUR DE PAULA CARDOSO

**AVALIAÇÃO DE COLETORES PARA A FLOTAÇÃO DE ESPUMA DO
ESPODUMÊNIO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel

Prof. Dra. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira
Universidade Federal de Lavras- MG

Prof. Dra. Isabele Cristina Bicalho
Universidade Federal de Lavras- MG

**LAVRAS – MG
2022**

ARTHUR DE PAULA CARDOSO

**AVALIAÇÃO DE COLETORES PARA A FLOTAÇÃO DE ESPUMA DO
ESPODUMÊNIO
EVALUATION OF COLLECTORS FOR SPODUMENE FOAM FLOTATION**

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel

APROVADA em 12 de setembro 2022.

Prof. Dra. Suellen Mendonça Nascimento, UFLA
Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira, UFLA
Prof. Dra. Isabele Cristina Bicalho, UFLA

Prof. Dra. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, sabedoria, força de vontade e coragem que me concede a cada dia.

Agradeço aos meus pais, Adriana e Júlio, por todo apoio e por nunca medirem esforços para me ver realizar meus sonhos e sempre querer o melhor o mim, vocês são os principais mestres dessa obra. A vocês todo meu amor, respeito e gratidão.

À minha professora orientadora, Suellen, que esteve ao meu lado nesse momento, agradeço por toda disponibilidade, auxílio, paciência e dedicação no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus irmãos, Mariana e Augusto, pelo apoio e amizade.

Aos demais familiares e amigos, pelo apoio, carinho e por sempre estarem torcendo e vibrando por mim em todos os momentos, principalmente aqueles que estiveram me acompanhando de perto.

À minha amiga, Ana Caroline, pela compreensão, força e por nunca me deixar desistir, agradeço por todos os momentos ao seu lado, mesmo na ausência.

A todos os meus colegas de trabalho, obrigado pela oportunidade de estar junto de vocês nesse tempo e aprender a cada dia como ser um excelente profissional.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia e todo seu corpo docente e técnico, por todo o conhecimento adquirido e auxílio durante esse tempo.

RESUMO

O tratamento ou beneficiamento de minérios visa a modificação da granulometria e a concentração das espécies minerais, tanto fisicamente quanto quimicamente. Um dos métodos utilizados para a concentração mineral é a flotação em espuma. O processo de flotação ocorre pela diferença nas características de superfície das espécies minerais presentes, na qual os minerais de interesse podem ser separados de outros minerais, pela introdução de uma fase gasosa em meio a uma solução aquosa. As partículas hidrofóbicas, por natureza ou por alguma alteração na sua superfície por reagentes (chamados de coletores) se prendem às bolhas de ar e são levadas até a camada de espuma, onde são coletadas. Esse material flotado é rico no mineral de interesse, enquanto os minerais hidrofílicos permanecem na fase aquosa, podendo ser descartados como rejeitos ou reaproveitados em outros processos. Neste trabalho, o mineral de interesse a ser concentrado pela flotação de espuma é o espodumênio, que é uma das principais fontes de lítio, podendo ser usado na produção de baterias recarregáveis, produtos químicos e também na produção de fármacos, cerâmicas e vidros. A depender do coletor utilizado, diferentes eficiências e condições de processos são observadas. Com isso, este trabalho tem objetivo a avaliação de novos coletores para a flotação de espuma do espodumênio em bancada, bem como suas condições, a fim de se ter ao final do processo uma boa recuperação mássica e metalúrgica, com alto teor de lítio e um rejeito com baixo teor, que vise uma maior eficiência para futuras aplicações industriais. Os testes foram realizados na empresa utilizando a célula de bancada da marca Brastorno®, onde pôde-se fazer diversos testes de flotação variando as condições como o uso da atrição química, de espumante e modificadores de pH, além da dosagem com 4 diferentes coletores comerciais. Para essas avaliações, se teve como parâmetros o projeto da planta industrial, objetivando-se um teor de concentrado acima de 5,50% e recuperação mássica e metalúrgica de 12% e 63%, respectivamente. Buscou-se também que o teor de rejeito fosse o mais baixo possível para se ter uma boa eficiência na flotação e pouca perda no rejeito. Diante dessas condições, foi possível observar que com o uso de todos os coletores a atrição química do minério se fez indispensável, bem como o uso do espumante, que favorece a formação da espuma e sua estabilidade. Com isso, os coletores A, C e D na dosagem de 500 g/ton apresentaram os melhores resultados, com exceção do coletor B, que apresentou resultados mais satisfatórios com uma dosagem de 600 g/ton de coletor.

Palavras-chave: Lítio. Flotação de espuma. Coletores. Teor de concentrado e rejeito. Recuperação mássica e metalúrgica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mineral de espodumênio.	15
Figura 2 – Principais reservas no mundo e projeção do preço do lítio até 2025.	17
Figura 3 – Circuito de beneficiamento da CBL.	19
Figura 4 – Representação do contato entre bolha/mineral com e sem coletor.	20
Figura 5 – Equipamento industrial de atrição.	22
Figura 6 – Tanque de condicionamento.	23
Figura 7 – Representação das etapas de flotação.	24
Figura 8 – Coletores usados na flotação de bancada.	25
Figura 9 – Célula de bancada BRASTORNO.	26
Figura 10 – Sistema de agitação e aeração da célula.	26
Figura 11 – Atrição química.	27
Figura 12 – Condicionamento.	27
Figura 13 – Flotação de espuma.	29
Figura 14 – Coleta do material flotado.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições usadas nos testes com cada coletor.....	28
Tabela 2 – Cinética coletor A, 500 g/ton, pH 10.....	29
Tabela 3 – Cinética de flotação primeiro minuto.....	30
Tabela 4 – Demais tempos de cinéticas.....	31
Tabela 5 – Testes com o coletor A.....	34
Tabela 6 – Testes com o coletor B.....	36
Tabela 7 – Testes com o coletor C.....	38
Tabela 8 – Testes com o coletor D.....	40
Tabela 9 – Melhores testes com cada coletor.....	41
Tabela 10 – Coletor A, 600 g/ton, pH 10, atrição, espumante.....	47
Tabela 11 – Coletor B, 1000g/ton, pH 10.....	48
Tabela 12 – Coletor B, 600g/ton, pH 10, atrição, espumante.....	49
Tabela 13 – Coletor C, 700g/ton, pH neutro.....	50
Tabela 14 – Coletor C, 500g/ton, pH neutro, atrição, espumante.....	51
Tabela 15 – Coletor D, 500g/ton, pH neutro, espumante.....	52
Tabela 16 – Coletor D, 500g/ton, pH neutro, atrição, espumante.....	53
Tabela 17 – Teste coletor A com 500g/ton.....	54
Tabela 18 – Teste coletor A com 500 g/ton e atrição.....	54
Tabela 19 – Teste coletor A com 600 g/ton.....	55
Tabela 20 – Teste coletor A com 600 g/ton e dosagem de espumante.....	56
Tabela 21 – Teste coletor A com 600 g/ton, atrição e dosagem de espumante.....	57
Tabela 22 – Teste coletor B com 1000 g/ton.....	58
Tabela 23 – Teste coletor B com 800 g/ton.....	58
Tabela 24 – Teste coletor B com 800 g/ton e espumante.....	58
Tabela 25 – Teste coletor B com 800 g/ton, atrição e espumante.....	59
Tabela 26 – Teste coletor B com 600 g/ton.....	59
Tabela 27 – Teste coletor B com 600 g/ton, atrição e espumante.....	59
Tabela 28 – Teste coletor C com 700 g/ton e pH neutro.....	60
Tabela 29 – Teste coletor C com 700 g/ton, atrição e pH neutro.....	60
Tabela 30 – Teste coletor C com 700 g/ton, espumante e pH neutro.....	61
Tabela 31 – Teste coletor C com 500 g/ton, espumante e pH8.....	61
Tabela 32 – Teste coletor C com 500 g/ton, espumante.....	61
Tabela 33 – Teste coletor C com 500 g/ton, atrição e pH neutro.....	62
Tabela 34 – Teste coletor C com 500 g/ton, atrição, espumante e pH neutro.....	62
Tabela 35 – Teste coletor D com 500 g/ton e pH 8.....	63
Tabela 36 – Teste coletor D com 500 g/ton, espumante e pH neutro.....	63
Tabela 37 – Teste coletor D com 500 g/ton, atrição, espumante e pH neutro.....	64

LISTA DE SIGLAS

a	Teor de alimentação
B	Boro
c	Teor de concentrado
CC	Concentrado <i>cleaner</i>
g	Gramas
g/ton	Gramas de coletor por toneladas de minério
Li	Lítio
Li ₂ O	Óxido de lítio
LiCl	Cloreto de lítio
L/min	Litros por minuto
Mg	Magnésio
min	Minutos
pH	Potencial hidrogeniônico
RC1	Rejeito <i>Cleaner 1</i>
RC2	Rejeito <i>Cleaner 2</i>
Rec.	Recuperação
Rec. Más.	Recuperação Mássica
Rec. Met.	Recuperação Metalúrgica
rpm	Rotação por minuto
RR	Rejeito <i>Rougher</i>
µm	Micrômetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Lítio	14
3.1.1	Espodumênio	15
3.1.2	Produção Mundial	15
3.1.3	Processos de beneficiamento do espodumênio	17
3.2	Flotação.....	19
3.2.1	Coletores, espumante e modificadores.....	20
3.2.2	Atrição química.....	22
3.2.3	Condicionamento	23
3.2.4	Cinética	23
3.2.5	<i>Rougher e Cleaner</i>	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Atrição química e deslamagem.....	26
4.2	Condicionamento	27
4.3	Cinética	28
4.4	Etapa <i>Rougher</i>	31
4.5	Etapa <i>Cleaner</i>	32
4.6	Análise das amostras	32
4.7	Cálculo da recuperação mássica e metalúrgica	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1	Coletor A.....	34
5.2	Coletor B.....	36
5.3	Coletor C.....	38
5.4	Coletor D.....	40
6	CONCLUSÕES.....	43
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	44
	APÊNDICE A – Cinéticas de flotação	47
	APÊNDICE B – Testes coletor A	54
	APÊNDICE C – Testes coletor B	58
	APÊNDICE D – Testes coletor C	60

APÊNDICE E – Testes coletor D	63
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Desde muito tempo o homem depende dos minerais para a sua sobrevivência. O Brasil, por possuir um extenso território, possui uma grande gama de minerais para ser explorado e beneficiado de várias formas, colocando o país em posições de destaque no mercado mundial. Os minerais e/ou seus derivados apresentam uma grande influência sobre a vida e desenvolvimento de um país, que vai desde a atividade agrícola até a industrial, como na metalurgia, na indústria química, construção civil e no cultivo da terra.

O tratamento ou beneficiamento de minérios visa a modificação da granulometria, a concentração das espécies minerais, tanto fisicamente quanto quimicamente, sendo essa última pela decomposição térmica ou mesmo por reações geradas na presença do calor. Segundo LUZ et. al (2010), a concentração do mineral de interesse, se baseia na diferença das propriedades entre o mineral de interesse e os de ganga. Essas propriedades podem ser densidade, condutividade elétrica, suscetibilidade magnética, química de superfície, cor e forma. Um dos métodos utilizados para a concentração de minérios é a flotação em espuma.

Com a crescente demanda de baterias recarregáveis para a produção de veículos elétricos e/ou híbridos, houve um interesse mundial na procura do lítio, sendo também este um mineral utilizado na produção de produtos químicos, como carbonato e hidróxido de lítio, mas podendo ser utilizado na produção de fármacos, cerâmicas, vidros e outros. Uma das principais fontes de lítio é o mineral espodumênio, que pode ser tratado pelo processo de flotação em espuma.

Atualmente, a flotação do espodumênio apresenta a seguinte problemática: um alto teor de rejeito denominado *rougher* no processo, que ocasiona uma baixa recuperação mássica e metalúrgica do minério de interesse.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Diante da problemática apresentada, esse trabalho tem como objetivo geral a avaliação de novos coletores para a flotação de espuma do espodumênio em bancada, bem como suas condições para futuras aplicações industriais.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, o processo tem que apresentar uma recuperação mássica e metalúrgica acima de 12% e 63%, respectivamente, um teor de Li_2O no concentrado acima de 5,50% e também rejeito rougher com baixo teor, a fim de minimizar perdas no processo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Lítio

O lítio é um metal leve, de textura macia, com número atômico 3, massa específico 0,534 g/cm³, massa atômico 6,941 g/mol e com temperaturas de fusão e ebulição em 180,54 °C e 1.342,8 °C respectivamente (LOPES, 2019). É representado pela sigla Li na tabela periódica e faz parte dos metais alcalinos, possuindo uma boa condução elétrica e sendo também um ótimo reativo (CHAGAS; CORRÊA, 2017).

Devido a todas essas características, ele é considerado o elemento ideal para ser usado em baterias, pilhas, na indústria aeronáutica e até mesmo no revestimento e na fabricação de cerâmicas, vidros (BRAGA; FRANÇA, 2013), produtos químicos e fármacos.

Em razão de sua alta reatividade, não é possível encontrar o lítio na natureza estando em sua forma elementar, ou seja, ele é encontrado sempre como um composto químico iônico (LOPES, 2019). Existem centenas de minerais que contém sua presença, mas poucos são os que tem potencial econômico de extração, como por exemplo o espodumênio e a petalita (BROWN et al., 2016).

Esse metal foi encontrado no ano de 1817 pelo estudioso Johan August Arfwedson enquanto estudava a petalita, um mineral descoberto por um brasileiro no ano de 1800. Entretanto, especula-se que seu surgimento tenha sido após o *big bang*, em que as altas temperaturas resultantes da fusão entre nêutrons e prótons deram origem aos núcleos atômicos. A continuação do resfriamento de prótons e nêutrons teriam elevado ainda mais as temperaturas até que foram capturados pelos núcleos atômicos formados, alguns elétrons que estavam soltos, e assim, foram constituídos o hidrogênio, o lítio e o hélio, os considerados os primeiros elementos formados e também os mais leves (BARROW, 2005).

O lítio possui um calor elevado e densidade energética alta, fazendo com que seja usado em processos que precisam de transferência de calor e também em baterias elétricas. No início, o componente não era isolado, mas isso mudou com a técnica de eletrólise do cloreto de lítio fundido realizada por Busen e Matthiessen em 1855 (RODRIGUES; PADULA, 2017).

Desde a descoberta desse mineral, sua demanda não sofreu grandes alterações, uma vez que apenas após muitos anos desde sua descoberta suas propriedades foram devidamente estudadas e ajustadas para ajudar com a tecnologia industrial. Assim, somente a partir dos anos 90, ocorreu uma explosão tecnológica nos setores das indústrias e a demanda pelo lítio aumentou consideravelmente (RODRIGUES; PADULA, 2017).

3.1.1 Espodumênio

O espodumênio, mostrado na Figura 1, é um dos principais minerais portadores de lítio, seu nome vem do grego *spodos*, devido a sua cor cinzenta adquirida quando aquecido. Sua fórmula química é $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, pertencente a classe dos silicatos e grupo dos inossilicatos. Possui origem magmática, hidrotermal, pneumatolítica e em algumas situações metamórfica. É um mineral encontrado em granito pegmatíticos, em aplitos e granitos litíferos (BORGES, 2019).

Figura 1 – Mineral de espodumênio.



Fonte: Soares (2021).

3.1.2 Produção Mundial

Quando se fala na produção a nível mundial do mineral lítio, o primeiro país que o produziu foi a Alemanha, partindo de outros minérios, a Bohemia e Saxonia. Logo, em 1925, uma indústria alemã chamada Metallgesellschaft começou a comercializar partindo do zinndwaldita, o lítio metálico. Posteriormente, nos Estados Unidos, mais precisamente na Carolina do Norte, houve o início da produção e também da comercialização de minerais que derivavam do lítio; eles eram submetidos a um processo alcalino realizado no espodumênio que gerava o carbonato de lítio (BRAGA; FRANÇA, 2013).

Nos anos 80, no Chile e na Argentina, houve uma alteração na tecnologia que era responsável pela produção dos sais de lítio, que passou a fabricar o carbonato de lítio usando os evaporitos (salmouras concentradas) com teor alto. Toda essa mudança fez com que nos Estados Unidos fossem fechadas várias produtoras de hidróxido e carbonato de lítio que eram feitos do espodumênio, uma vez que demandava gastos altos para o processamento quando comparado com o realizado a partir dos evaporitos (BRAGA; FRANÇA, 2013).

No Brasil, o lítio está associado a minerais como o espodumênio, a petalita, a lepidolita e a ambligonita, chamados de pegmatíticos. Nos anos 70, o país já os utilizava para fabricar vidros, cerâmicas e esmaltes (DELGADO; STIER; CAMPOS, 2018).

Antes, a Companhia Brasileira de Lítio – CBL era atuante principal quanto ao processo de produção do espodumênio, utilizando o meio-denso como método de concentração, o que permanece ainda sendo feito no mundo industrial nacional. Sua usina de beneficiamento tem capacidade de produção de 30 mil toneladas de espodumênio com teor de concentrado de 5,50% de lítio, produção essa alimentada pelo pegmatito litinífero, que passa pelas etapas de cominuição, classificação e por último processado pela unidade de meio-denso (SOARES, 2021).

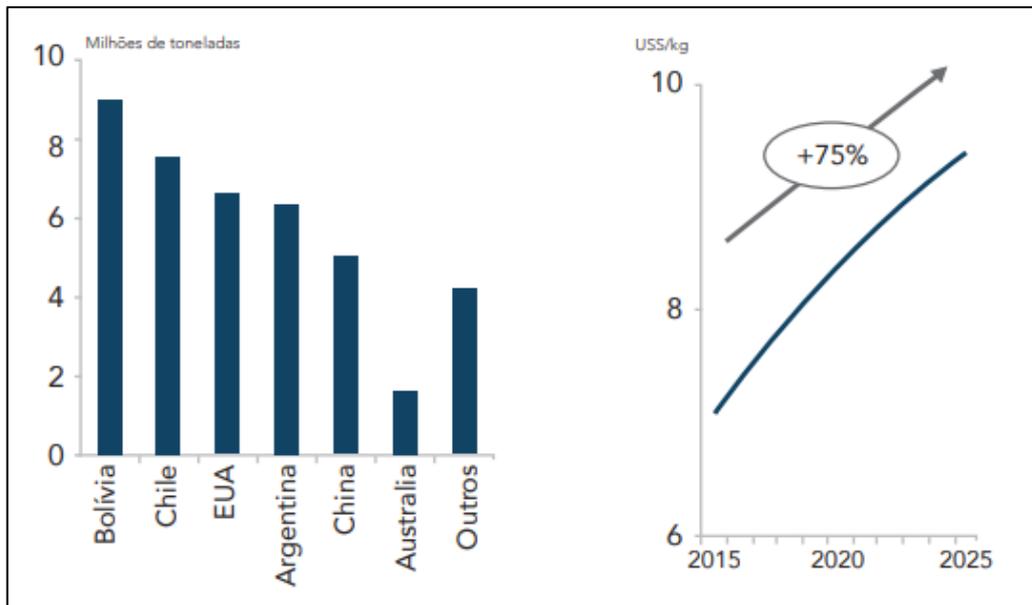
O processo de produção da CBL busca extrair o lítio do espodumênio baseado na rota ácida, depois deste passar pela fase de decriptação em fornos calcinadores. Após a purificação da solução de sulfato de lítio extraída, a mesma passa por uma reação com a barrilha e é transformada em carbonato de lítio. Para a transformação em hidróxido de lítio, parte do carbonato de lítio é reprocessado por meio de uma reação de caustificação com cal hidratada (BRAGA; FRANÇA; CELINO, 2013).

Nos dias de hoje, com a AMG Brasil dentro do mercado nacional de lítio, a produção do mineral concentrado é feita utilizando o método de flotação direta e posteriormente ao processo de separação magnética com uma capacidade de 90 mil toneladas por ano (SOARES, 2021), em que futuramente com a expansão da planta essa capacidade passará para 130 mil toneladas/ano de espodumênio (BIANCHETTI, 2022).

Na atualidade, o mineral lítio assume um papel de suma importância, devido à necessidade de novas demandas de fornecimento de energia, e conseqüentemente a imprescindibilidade de seu armazenamento, podendo se falar aqui na energia solar e eólica (LOPES, 2019), que tem sido alvos de grandes investimentos das empresas que não fazem parte do setor elétrico e procuram apostar em energias renováveis, principalmente para serem aplicadas em países pobres.

Esse avanço na tecnologia traz a grande possibilidade de um melhor desempenho e menor custo das baterias de íons, indicadas para carros elétricos. Se comparados com os preços vigentes no ano de 2014 e 2015, o preço do carbonato de lítio cresceu de 10 a 15% e a previsão até 2025 é de que cresça ainda mais e atinja o percentual de 75%, com mostra a Figura 2. Esse grande aumento não visa apenas atender a demanda por veículos elétricos, mas incluem também as baterias utilizadas para distribuir energia em residências e distribuidoras de energia elétrica (DELGADO; STIER; CAMPOS, 2018).

Figura 2 – Principais reservas no mundo e projeção do preço do lítio até 2025.



Fonte: Lins e Morais, 2016 apud Delgado, Stier e Campos (2018).

Além da Austrália, China e Estados Unidos, pode-se dizer que esse mercado de extração do mineral lítio foi dominado também por quatro empresas que são da Argentina, Bolívia e Chile, que ficaram popularmente conhecidas como o ABC do lítio (DELGADO; STIER; CAMPOS, 2018).

3.1.3 Processos de beneficiamento do espodumênio

O ato, processo ou trabalho de extração de minérios ou minerais industriais e o seu transporte até seu tratamento ou uso, pode ser definido por lavra. Logo, existem dois tipos de lavra, que são: lavra subterrânea e lavra a céu aberto. Os métodos e operações de cada lavra depende do tipo de minério e sua forma de ocorrência, para que, dessa forma, possam ser realizados o beneficiamento e a extração adequados (GEOSCAN, 2020).

Nesse sentido, os minérios de lítio podem ser lavrados tanto a céu aberto quanto por meio de lavra subterrânea, uma vez que a lavra do espodumênio é feita a céu aberto através do sistema de bancadas, sendo o desmonte por meio da utilização de explosivos, enquanto a lavra subterrânea ocorre no sistema de câmara e pilar (MENDES, 2009).

No entanto, por se tratar de um metal de baixo teor, as operações de beneficiamento possuem um alto custo, a não ser que, ao invés da lavra de minerais pegmatíticos, como o espodumênio e a petalita, ocorra a extração e o processamento de salmouras ricas em lítio. Nesse caso, utilizam-se métodos mais simples e mais baratos, como por exemplo, no Salar de

Atacama, no Chile, onde as salmouras são bombeadas de uma profundidade de 30 metros, para as lagoas de evaporação na superfície (BRAGA e SAMPAIO, 2008).

Pela evaporação são formados inicialmente precipitados compostos por halita, o restante dessa salmoura é bombeado para outro tanque onde se precipita silvita. Após repetitivos processos de evaporações, o lítio é precipitado a uma concentração de 6%, equivalente a 38% de LiCl, também são precipitados Mg e B, a uma concentração de 1,8 e 0,8% respectivamente, esse concentrado é então purificado e encaminhado para a produção do carbonato de lítio (MENDES, 2009).

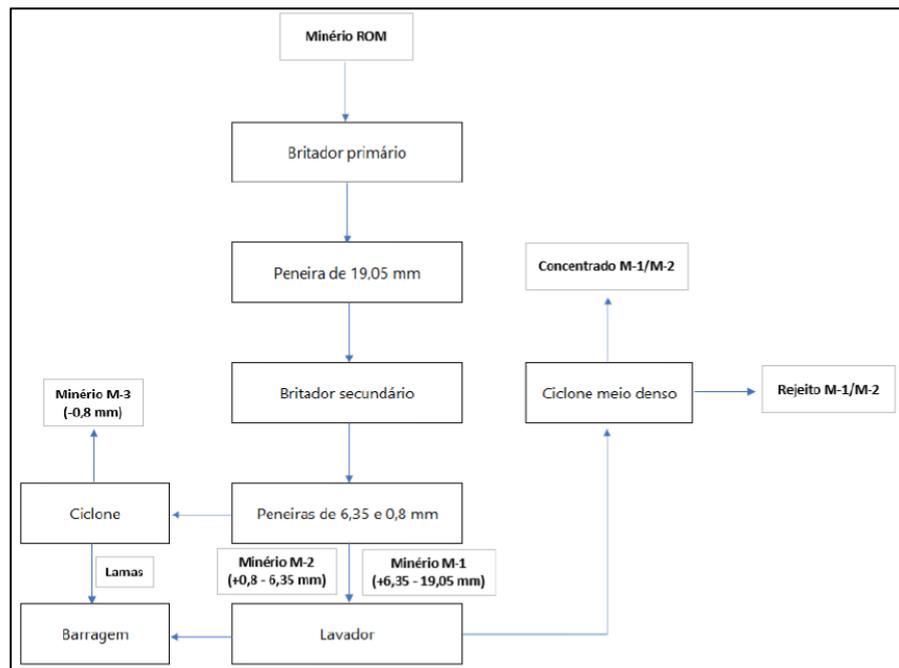
Também é válido ressaltar quanto ao processo de beneficiamento dos minérios de lítio, que por sua vez, é muito dispendioso devido ao baixo teor do metal. O material passa primeiramente por etapas de britagem para redução granulométrica, para então ser submetido às operações de concentração. Neste processo, as operações mais utilizadas são a catação manual (handsorting), a separação em meio denso (tambor ou dynawhirpool) e a separação magnética de alta intensidade (SALOMÃO; BORGES, 2020).

Logo, a separação em unidade de meio-denso é dos métodos mais utilizado em escala industrial no Brasil até então, e é por meio deste que se torna possível obter o concentrado de espodumênio (SOARES, 2021).

Salomão e Borges (2020) evidencia que no Brasil, as principais reservas de minério de lítio estão localizadas em Minas Gerais, no Vale do Jequitinhonha, nos municípios de Araçuaí e Itinga, onde se encontra reservas de espodumênio, ambligonita, lepidolita e petalita. Estudos apontam que os primeiros minerais de lítio da região foram descobertos em 1950, dos quais se tratavam de cassiterita, sendo descoberto mais tarde, a existência de ambligonitas em pegmatitos no vale do Piauí.

Dessa forma, o minério tem o processo iniciado com as etapas de cominuição/classificação, realizadas com os britadores e peneiras vibratórias. A concentração é realizada com uma granulometria de 6,35 a 19,05 mm e com um teor de 1,5% de Li₂O, em um circuito ao qual é usado hidrociclone de meio-denso. O concentrado produzido tem um enriquecimento de 3,3%, o que corresponde a um teor de cerca de 5% Li₂O, a Figura 4 apresenta o circuito de beneficiamento da CBL (SALOMÃO; BORGES, 2020).

Figura 3 – Circuito de beneficiamento da CBL.



Fonte: SALOMÃO; BORGES (2020).

Ademais, uma das principais técnicas de concentração de minerais na etapa de beneficiamento é a flotação, que por sua vez pode ser realizado de duas maneiras: flotação direta ou reversa, podendo ser utilizados coletores catiônicos ou aniônicos (ROJAS et al., 2019).

3.2 Flotação

A flotação em espuma, ou somente flotação, é um processo de separação de partículas sólidas que estão em suspensão em água, que explora diferenças nas características de superfície entre as espécies minerais presentes, na qual é introduzida nesse meio uma fase gasosa (CHAVES, 2006).

Sem a descoberta da flotação nos últimos cem anos, o desenvolvimento da indústria mundial não teria sido possível, pois através dos processos físicos tradicionais, como a separação magnética, eletrostática e gravimétrica, o processo de produção de metais básicos como chumbo, cobre, níquel e zinco, e também de metais nobres e do fosfato para o desenvolvimento da agricultura, não seria possível, muito menos a produção de minério de ferro, ao qual, a flotação é largamente utilizada na produção de aço (OLIVEIRA, 2006). A flotação, também pode ser empregado para diversos minerais, como óxidos, sulfetos, silicatos e entre outros, como também para uma vasta granulometria (LIMA; VALADÃO, 2008).

O processo de flotação ocorre pela diferença nas características de superfície das espécies minerais presentes, na qual os minerais de interesse podem ser separados de outros

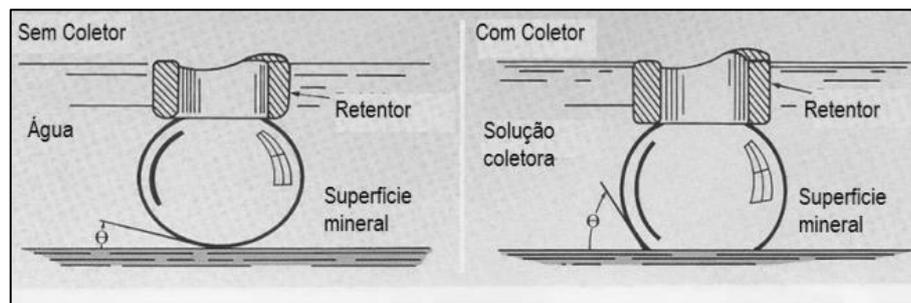
minerais. A concentração desses minerais ocorre por meio de uma solução aquosa e suscetivelmente pela introdução de uma fase gasosa no meio, na qual as partículas hidrofóbicas, por natureza ou por alguma alteração na sua superfície por reagentes, ou seja, por coletores, se prendem às bolhas de ar e são levadas até a camada de espuma. Nessa camada, as partículas são coletadas, sendo esse material flotado rico no mineral de interesse, enquanto os minerais hidrofílicos permanecem na fase aquosa, podendo ser descartados como rejeitos ou reaproveitados em outros processos.

3.2.1 Coletores, espumante e modificadores

Na flotação, os reagentes são atuantes de suma importância, visto que atuam no controle das características que estão ligadas ao processo como um todo. Há aqui, uma classificação conforme sua atuação, sendo divididos em coletores, espumantes e modificadores (CARVALHO, 2018).

Os coletores e espumantes, são classificados como surfatantes, pelo fato de exercer caráter duplo, que consiste em um grupo polar e outro apolar. Os coletores atuam na adsorção da interface sólido/líquido de certos minerais, deixando hidrofóbica a superfície da partícula, aumentando assim o ângulo de contato da bolha com o mineral, conforme Figura 3, enquanto os espumantes, influenciam na ligação bolha/mineral (MAPA, 2006).

Figura 4 – Representação do contato entre bolha/mineral com e sem coletor.



Fonte: CHAVES; FILHO; BRAGA (2010).

Os coletores aniônicos, possuem sua composição variada, podendo ser com base no enxofre e ácidos orgânicos. Os coletores catiônicos, são derivados de aminas e seus acetatos. São também considerados menos seletivos que os coletores aniônicos e facilmente afetados por modificadores, por serem adsorvidos e desorvidos fácil e rapidamente e tem sua aplicação na flotação de não metálicos, como o quartzo, silicatos, micas e etc. (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

Os ácidos graxos usado na flotação direta de minerais possuem em sua cadeia longa, átomos de carbono e hidrogênio e são caracterizados por apresentar um radical carboxila (OLIVEIRA, 2005). Os ácidos graxos podem ser obtidos a partir de óleos vegetais, como casca de arroz, soja, mamona e óleos comestíveis brutos e também podem ser obtidos através de subprodutos da fabricação de celulose, que é chamado de “*tall oil*”. Todos esses óleos são uma mistura de ácidos graxos e podem também apresentar em seu meio outros componentes, que dependendo geram problemas, como a solidificação na estação fria, dificultando sua dosagem. Os principais componentes do “*tall oil*” são os ácidos oléico, linolênico, linoléico e resínicos. Esses coletores a base de ácidos graxos, trabalham em sua maioria em meio alcalino, que quer dizer que são saponificados (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

Passando para o processo de saponificação, é uma reação de ácido-base em que ocorre a formação de sal (sabão), através do ácido carboxílico em conjunto com a reação de uma base orgânica ou inorgânica (GUIMARÃES, 2004), com isso, pode-se dizer que se trata da união de éster e sal orgânico em uma solução aquosa, gerando assim uma reação conhecida como hidrólise alcalina de óleo. Para o processo de saponificação dos óleos, pode-se utilizar hidróxido de sódio (mais comumente utilizado), hidróxido de potássio, uma mistura dos dois, carbonatos de sódio e potássio, amônia e bases orgânicas (OLIVEIRA, 2005).

Batista (2018) conta que desde os primórdios, antes mesmo de Cristo, o povo romano fazia o processo de saponificação utilizando gordura de cabra e cinzas vegetais sob aquecimento, assim, os elementos presentes na madeira aquecida, ou seja, o carbonato de sódio e carbonato de potássio, saponificavam os triglicerídeos.

Conforme Bulatovic (2007), os espumantes são compostos tenso-ativos heteropolares, contendo uma cadeia hidrocarbônica e um grupo polar, o que torna possível a adsorção na interface água/ar. O espumante cria condições mais favoráveis para a formação da espuma, concentrando na interface água/bolhas de ar formando uma espécie de envelope ao redor das bolhas, impedindo a colisão. Ele atua também na redução da tensão superficial na interface, fazendo com que a bolha fique mais resistente e melhore as condições de coleta das partículas.

Mamede (2016) complementa e simplifica a explicação, apontando em uma breve conceituação que os espumantes atuam na diminuição da tensão superficial da água, ao qual, os mesmos ajudam na formação e estabilidade das bolhas que formam a espuma.

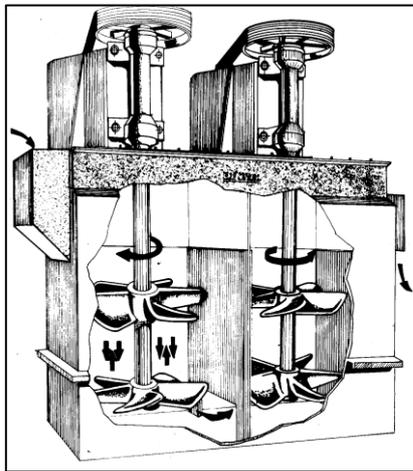
Os modificadores podem ser agentes depressores, reguladores de pH, ativadores e agentes dispersantes. Os depressores são agentes utilizados para deprimir certas espécies minerais presentes na polpa, já por outro lado, tem-se os ativadores, que são capazes de aumentar e/ou tornar a ação dos coletores mais seletiva sobre a superfície mineral. Os

dispersores são capazes de individualizar as partículas que estão agregadas para depois ocorrer uma separação e são comumente usados em processos que tem muito material fino e/ou lamas. Já os reguladores de pH, são de suma importância na flotação, pois atuam no potencial zeta dos minerais, na dissociação e adsorção de coletores, dentre outras funções (CHAVES, 2010).

3.2.2 Atrição química

O processo de atrição ou escrubagem, é uma operação na qual a polpa é submetida ao atrito entre grãos, causado pela agitação intensa das massas. Nesse processo ocorre a separação das partículas que estão unidas por material argiloso, por precipitados salinos, ou por outro material de alguma semelhança, pela ação de forças relativamente fracas (QUEIROZ, 2003). No processo de beneficiamento de minerais, a atrição é utilizada para realizar a deslamagem de minérios, ou seja, na remoção de partículas de granulometria fina (que entre 10 μm e 1 μm , que são considerados partículas ultrafinas e abaixo disso como colóides, sendo eles constituintes das lamas) que estão presentes na superfície de outros minerais (MEDEIROS, 2022). O processo de atrição é realizado em equipamento industrial específico, conforme mostra a Figura 4, mas em testes de bancada, o mesmo é realizado no próprio equipamento.

Figura 5 – Equipamento industrial de atrição.



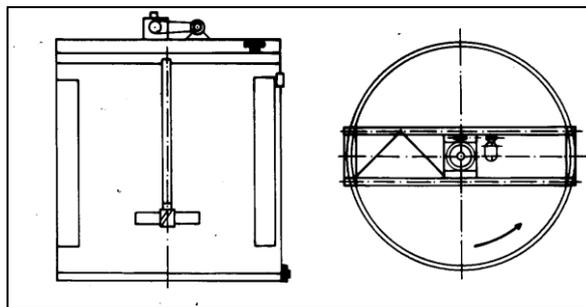
Fonte: CHAVES; FILHO; BRAGA (2010).

As partículas finas e/ou lamas ocasionam diversos problemas durante o processo de flotação, por possuírem uma pequena massa e uma grande área superficial, dentre elas podemos destacar a baixa probabilidade de colisão das partículas e adesão, o alto consumo de reagentes, pela alta área superficial, pela cobertura de outras partículas por lama (*slimes coating*) e o arraste dessas partículas pelo fluxo de polpa (MAPA,2006).

3.2.3 Condicionamento

O condicionamento é o tempo necessário para que as partículas minerais e as moléculas de reagentes possam se conectar na superfície da partícula mineral, coletando-a, ativando-a ou deprimindo-a, esse processo é feito com pouca diluição da polpa e alta agitação (CHAVE; FILHO; BRAGA, 2010), processo esse feito em tanque cilíndrico, como mostra a Figura 5, ou no próprio equipamento de bancada.

Figura 6 – Tanque de condicionamento.



Fonte: CHAVES; FILHO; BRAGA (2010).

3.2.4 Cinética

A cinética química é o ramo da engenharia química que se dedica a estudar taxas de reações químicas, ou seja, velocidade e mecanismos de reações. Na cinética de flotação, não ocorrem reações químicas, devido aos minerais não se transformarem e sim apenas se separem fisicamente, ou seja, ocorre a concentração de alguma espécie. Assim, fazendo um adentro entre a engenharia química e a engenharia de minas, o que se denomina conversão (X) na engenharia química, pode ser considerada como recuperação metalúrgica na de minas. Contudo, do ponto de vista da engenharia, ao se relacionar a recuperação metalúrgica do mineral de interesse ao tempo de flotação, pode-se dimensionar circuitos industriais e também avaliar e controlar as condições de processo (BRAGA, 2021), definindo tempos de residências do minério nas células de flotação, bem como o tempo de coleta.

3.2.5 *Rougher e Cleaner*

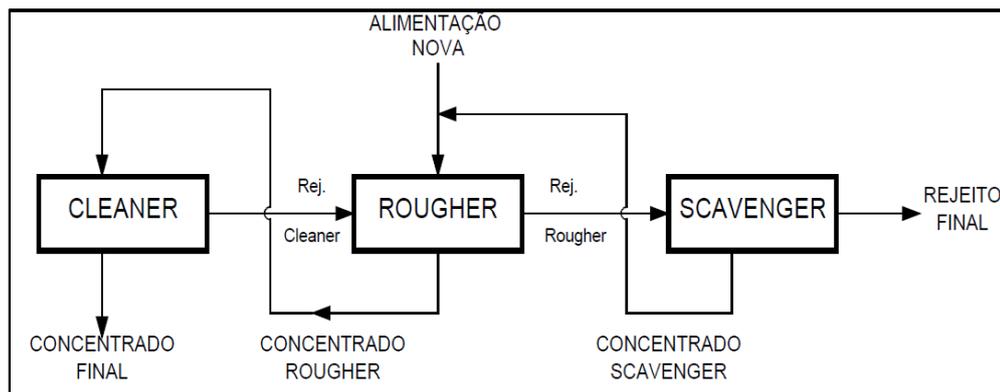
Conforme já abordado, no processo de Flotação é difícil obter o mineral concentrado de uma só vez, e por isso, foram desenvolvidas mais etapas que auxiliam no aproveitamento do material que é tratado (MENDES et al., 2018).

Inicialmente, é executada a etapa de *rougher*, no qual se tem um concentrado pobre e um rejeito ainda com mineral-minério. Posteriormente, o rejeito atravessa uma segunda etapa, que é conhecida como *scavenger*, e busca recuperar a parcela ainda existente de material. Logo, o concentrado *rougher* passa em uma etapa chamada *cleaner*, que aumenta o teor até conseguir um teor suficiente para alcançar um concentrado final (ANDRADE, 2014).

O rejeito da etapa *cleaner* e o concentrado da etapa *scavenger* são juntados para retornarem ao circuito, porque o concentrado é pobre para ser o produto final, enquanto o rejeito é rico demais para ser descartado (ANDRADE, 2014).

A Figura 6 mostra a execução das etapas da Flotação, mas, estas não acontecem de tal forma como sendo uma regra geral. Existe ali, a possibilidade da junção das etapas dentro do circuito apresentado, trabalhando as etapas de *rougher*, *cleaner* e *scavenger* conforme o mineral necessitar durante seu processamento (WILLS; FINCH, 2015).

Figura 7 – Representação das etapas de flotação.



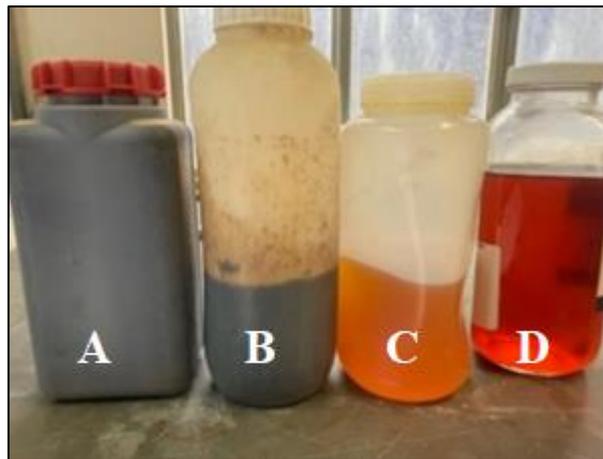
Fonte: Luz et al (2010).

Conforme explica Andrade (2014), atualmente, a flotação é o método mais utilizado para realizar a concentração de minérios que possuem baixo teor e todo esse processo é feito por meio das interações interfaciais de partículas que permanecem em meio aquoso.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação dos coletores foi adotado um conjunto de diferentes procedimentos para a flotação em espuma, como a atrição química e a deslamagem, uso de espumante e modificadores de pH. Tais procedimentos permitiram ao final avaliar os coletores com a maior eficiência bem como a dosagem de cada um. Os coletores que foram usados no presente trabalho foram denominados como coletor A, B, C e D, conforme mostra a Figura 7. Os coletores A e B, por apresentarem característica físico-químicas parecidas, tem vários tipos de ácidos graxos em sua composição, sendo os principais os ácidos linoleico ou oleico que representa cerca de 79% da composição, já os outros dois coletores, também apresentam características físico-químicas parecidas, mas com um maior grau de pureza, sendo que os ácidos linoleico e oleico representam cerca de 95% da composição.

Figura 8 – Coletores usados na flotação de bancada.



Fonte: Do autor (2022).

As amostras utilizadas nos testes, foram coletadas no tanque de alimentação da flotação da planta industrial, onde esse material coletado não passa por nenhuma alteração química na superfície antes de entrar no circuito de flotação.

Os testes foram conduzidos no laboratório da empresa e foi utilizada a célula de bancada da marca BRASTORNO®, como apresentado na Figura 8.

Figura 9 – Célula de bancada BRASTORNO.



Fonte: Do autor (2022).

O princípio de funcionamento da célula de flotação de bancada, consiste em um rotor em sua base, como indicado na Figura 9, que faz o processo de agitação da polpa e um sistema de aeração que é feito por dentro do eixo através do tubo azul indicado na Figura 9, em que o ar sai através do rotor e é espalhado no meio pelo rotor.

Figura 10 – Sistema de agitação e aeração da célula.



Fonte: Do autor (2022).

4.1 Atrição química e deslamagem

Para o processo de atrição química, mostrado na Figura 10 e deslamagem da amostra, que tem por objetivo a limpeza do material, foi pesada 1000g de amostra em base seca, 1300g de água e adicionado hidróxido de sódio a uma dosagem de 250 g/ton, até atingir aproximadamente o pH 10. O processo foi feito sob agitação da polpa em 1650 rpm durante 5 minutos. Após esse tempo, foram esperados mais 3 minutos para o descarte da água de atrição.

Figura 11 – Atrição química.



Fonte: Do autor (2022).

4.2 Condicionamento

Para que o coletor pudesse atuar na superfície da partícula foi feito o condicionamento da polpa, como mostra a Figura 11, ao qual é dado um certo período para que o coletor possa se aderir a superfície da partícula sob certa agitação. O condicionamento foi feito após a etapa de deslamagem, com uma agitação da polpa em 1650 rpm durante 7 minutos após a dosagem do coletor. Durante esse processo de condicionamento foi feito também a modificação do pH logo no início e a dosagem de espumante foi feita após 5 minutos de condicionamento.

Figura 12 – Condicionamento.



Fonte: Do autor (2022).

A Tabela 1, referência as dosagens dos coletores, bem as condições que foram usadas em cada teste, como o uso da atrição, espumante e se houve alteração do pH.

Tabela 1 – Condições usadas nos testes com cada coletor.

Coletor	Teste	Condições			
		Dosagem coletor (g/ton)	pH	Atrição	Espumante
A	1	500	10	não	não
	2	500	10	sim	não
	3	600	10	não	não
	4	600	10	não	sim
	5	600	10	sim	não
B	1	1000	10	não	não
	2	800	10	não	não
	3	800	10	não	sim
	4	800	10	sim	sim
	5	600	10	não	não
	6	600	10	sim	sim
C	1	700	neutro	não	não
	2	700	neutro	sim	não
	3	700	neutro	não	sim
	4	500	8	não	sim
	5	500	neutro	não	sim
	6	500	neutro	sim	não
	7	500	neutro	sim	sim
D	1	500	8	não	não
	2	500	neutro	não	sim
	3	500	neutro	sim	sim

Fonte: Do autor (2022).

4.3 Cinética

A cinética de flotação foi feita para se determinar o tempo de coleta da etapa *rougher* do processo, em que foi analisado o teor e recuperação metalúrgica do espodumênio a cada minuto da flotação.

O ensaio da cinética de flotação foi feito após o condicionamento da polpa. A flotação se iniciava com a diminuição da agitação para 1400 rpm e com o acionamento do sistema de aeração em 5 L/min de ar, como mostra a Figura 12. Ao iniciar a coleta do flotado foi acionado o cronômetro, no qual esse flotado foi coletado a cada 1 minuto fazendo sempre a troca da bandeja, o processo era repetido até que a flotação cessasse. Feito esse processo foi determinado que o tempo de coleta para todos os coletores na etapa *rougher* era de 5 minutos, pois passado esse tempo observou-se que não havia mais material que pudesse ser flotado.

Figura 13 – Flotação de espuma.



Fonte: Do autor (2022).

A Tabela 2, exemplifica o teste de cinética feito, onde apresenta os teores do concentrado da flotação *rougher* e rejeito *rougher*, além das recuperações mássicas e metalúrgicas a cada minuto de coleta.

Tabela 2 – Cinética coletor A, 500 g/ton, pH 10.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,03	100%
Concentrado (1min)	13,96%	4,52	61,08%
Concentrado (2min)	5,25%	2,6	13,23%
Concentrado (3min)	3,28%	1,54	4,89%
Concentrado (4min)	2,33%	1,2	2,70%
Concentrado (5min)	1,60%	0,9	1,40%
Concentrado (7min)	2,07%	0,73	1,46%
Rejeito Rougher	71,51%	0,22	15,23%

Fonte: Do autor (2022).

Já a Tabela 3, apresenta os dados da flotação no primeiro minuto de coleta, já apresentados na Tabela 2 e os valores calculados para o rejeito nesse primeiro minuto. Já o teor de rejeito desse primeiro minuto é feito através de cálculos onde é pego o teor de alimentação da amostra calculada da Tabela 2 e é subtraído o produto da multiplicação entre o concentrado e sua recuperação mássica. A recuperação mássica do rejeito é soma das recuperações dos outros concentrados mais a do rejeito final. O teor de alimentação também é feito através de cálculos, onde é feito as somas dos produtos da multiplicação entre o concentrado e a recuperação mássica.

Tabela 3 – Cinética de flotação primeiro minuto.

1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,98	100%
Concentrado	13,96%	4,52	64,59%
Rejeito	86,04%	0,40	35,41%

Fonte: Do autor (2022).

A Tabela 4, apresenta o restante desses cálculos de cinética dos outros minutos, onde teor do rejeito de cada minuto é a referência que se tem do teor de alimentação do minuto seguinte. Como pode ser observado, esse cálculo é feito da mesma forma que o anteriormente descrito, na qual nesses outros ao invés de pegar o teor de alimentação, se pega o teor do rejeito do minuto anterior, e a recuperação mássica, é feita excluindo a massa do minuto anterior. Assim, são feitas as cinéticas de flotação, que ao observarmos depois de 5 minutos de flotação os teores já não se altera e as recuperações também não são favoráveis para a continuidade da coleta e tempos muito grandes de coleta não são favoráveis em escala industrial, pois irá demandar maior tempo de residência dentro dos equipamentos para que a coleta atinja o ponto ideal.

Tabela 4 – Demais tempos de cinéticas.

2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,41	100%
Concentrado	6,11%	2,6	38,92%
Rejeito	93,89%	0,27	61,08%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,27	100%
Concentrado	4,06%	1,54	23,29%
Rejeito	95,94%	0,21	76,71%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,22	100%
Concentrado	3,00%	1,2	16,58%
Rejeito	97,00%	0,19	83,42%
5 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,19	100%
Concentrado	2,13%	0,9	10,21%
Rejeito	97,87%	0,17	89,79%
7 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,23	100%
Concentrado	2,82%	0,73	8,77%
Rejeito	97,18%	0,22	91,23%

Fonte: Do autor (2022).

No Apêndice A são mostrados os resultados de outros testes de cinética realizados, que demonstram tal afirmação e escolha do tempo.

4.4 Etapa *Rougher*

Na etapa *rougher* é onde se executa a primeira etapa da flotação, onde se obtém um concentrado com um teor ainda baixo para o esperado e um rejeito com baixos teores do minério de interesse. Essa etapa é feita logo após o condicionamento do material com as mesmas condições que foram impostas na etapa anterior. O tempo, como foi estabelecido para a coleta, foi de 5 minutos. O rejeito *rougher* gerado não será submetido a etapa de *scanvanger*, pois o intuito dessas avaliações como mencionado é ter o mínimo de Li_2O no rejeito.

4.5 Etapa *Cleaner*

A etapa *cleaner* é a etapa após a etapa *rougher*, na qual o concentrado da etapa anterior é re-lavado. Essa etapa foi feita em dois estágios. No primeiro, o concentrado da etapa *rougher* era novamente flotado obtendo-se o primeiro concentrado e o rejeito. No segundo estágio, esse primeiro concentrado da etapa *cleaner* era levado novamente para a flotação, obtendo um segundo rejeito e o concentrado final do processo. Para as duas etapas *cleaner* a agitação da polpa e a aeração foram mantidas iguais a do *rougher*. A coleta, que está ilustrada na Figura 13, era finalizada quando toda a espuma formada durante o processo acabava.

Figura 14 – Coleta do material flotado.



Fonte: Do autor (2022).

Ao final de todo o processo de flotação em bancada, são gerados o rejeito *rougher*, os rejeitos *cleaner* 1 e 2, que foram gerados na etapa *cleaner* e o concentrado *cleaner*, que é o concentrado final de todo o processo.

4.6 Análise das amostras

Após a coleta de todas as amostras geradas durante os testes descritas acima, elas foram levadas para o laboratório da empresa, onde foram filtradas em filtros de pressão e secas em uma estufa a 105°C. Depois de secas, elas foram pesadas e uma pequena fração delas levadas para o laboratório químico para análises dos teores que foram geradas em cada uma.

4.7 Cálculo da recuperação mássica e metalúrgica

Com os pesos das amostras já secas, é feito o cálculo de recuperação mássica que foi gerado em cada amostra, pela Equação 1, onde a massa de cada amostra é dividida pela soma de todas as amostras e multiplicado por 100.

$$\text{Rec. mássica} = \frac{CC}{(CC+RC1+RC2+RR)} \times 100$$

(1)

Onde, CC é a massa de concentrado *cleaner*, RC1 e RC2 é a massa dos rejeitos *cleaner* 1 e 2 e RR é a massa de rejeito *rougher*.

Para o cálculo da recuperação metalúrgica, é utilizado o valor da recuperação mássica que é multiplicado teor do concentrado e dividido pelo teor de alimentação, como apresentado pela Equação 2.

$$\text{Rec. metalúrgica} = \frac{(\text{rec. mássica}) \cdot c}{a}$$

(2)

Onde, c é o teor de concentrado final e a é o teor de alimentação calculado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Coletor A

Como pode ser observado na Tabela 5, todos testes realizados com o coletor A foram conduzidos com o pH básico, com o valor de 10, tanto nas etapas de flotação *rougher* e *cleaner*, como também no processo em que houve a atrição do minério. Esse valor de pH foi escolhido devido a esse coletor ser um ácido graxo com menor grau de pureza, tendo em sua formulação outros componentes e apresentar baixa solubilidade, sendo necessário sua saponificação.

Tabela 5 – Testes com o coletor A.

Teste	Condições				Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	Dosagem coletor (g/ton)	pH	Atrição	Espumante				
1	500	10	não	não	5,96 ± 0,53	0,44 ± 0,11	9,85 ± 2,04	56,55 ± 10,63
2	500	10	sim	não	5,72 ± 0,67	0,22 ± 0,08	14,24 ± 1,97	78,40 ± 6,59
3	600	10	não	não	5,39 ± 0,48	0,54 ± 0,14	9,93 ± 3,75	46,84 ± 10,46
4	600	10	não	sim	5,62 ± 0,51	0,47 ± 0,13	11,65 ± 2,18	59,05 ± 11,27
5	600	10	sim	não	5,84 ± 0,51	0,37 ± 0,17	15,58 ± 2,57	72,70 ± 9,41

Fonte: Do autor (2022).

O primeiro teste, apresentado na Tabela 5, pode-se observar que o coletor apresentou um bom desempenho para o teor médio de concentrado do minério, cujo o teor de projeto para a produção industrial é de no mínimo 5,50% de concentrado de espodumênio. No entanto, para a recuperação mássica da flotação obteve-se um valor médio abaixo do valor projetado para essa planta industrial, de 12%, e como consequência observou-se também uma baixa recuperação metalúrgica, onde objetivava-se um valor médio de 63%.

Na realização de segundo teste com esse coletor, observa-se em relação ao primeiro teste sem atrição, que o teor de concentrado também se manteve acima do esperado e o teor médio do rejeito *rougher* diminuiu pela metade. O teor de rejeito mais baixo é uma vantagem, pois dessa maneira tem-se uma menor perda de lítio, tornando o processo mais eficiente, aumentado assim também a recuperação do material. Além disso, obteve-se neste segundo teste, uma maior recuperação mássica e consequentemente uma ótima recuperação metalúrgica do processo com valores acima do projetado. Já o terceiro teste com o coletor A, como pode ser observado na Tabela 5, foi utilizado os mesmos parâmetros do primeiro teste, aumentando somente a dosagem de coletor para 600 g/ton. Ao compará-los, pode-se observar uma diminuição no teor médio de concentrado e recuperação metalúrgica, e um aumento do teor de

rejeito, apesar de a recuperação mássica se manter constante. Dessa maneira, esses resultados se mostraram piores do que os apresentados no primeiro teste, uma vez que os valores encontrados para essas variáveis se mostraram abaixo dos valores de projeto mencionados anteriormente. Uma das hipóteses pelo ocorrido, pode ser pelo fato de que com o aumento da concentração de coletor, houve a flotação de outros minerais que estão no meio ou o arraste de outras partículas pelas bolhas de espuma, fazendo com que a concentração de lítio diminuísse.

Para o quarto teste, como pode ser observado pela Tabela 5, usamos a dosagem de 600 g/ton de coletor e também foi feita a dosagem de espumante no teste. Ao observar os resultados, observou-se que com a adição do espumante houve uma melhora no resultado obtido em relação ao resultado apresentado no teste 3, contudo os valores de recuperação mássica e metalúrgica ficaram bem próximos ao projetado. Além disso esses valores continuam menores do que o do segundo teste na qual foi feita a atrição, pois como já mencionado a atrição química serve para uma limpeza das partículas, como na retirada de produtos químicos provenientes de outros processos e também na retirada de partículas menores que impedem o coletor de aderir na superfície do material.

Para o último teste com o coletor A, dados pelas condições estabelecidas pelo teste 5, como a dosagem de 600 g/ton de coletor, atrição e dosagem de espumante, pode-se notar que ao compararmos com os outros testes com a mesma dosagem houve uma grande melhora nos resultados tanto em relação aos teores como em recuperação e também com valores dentro do de projeto para produção industrial. Já havia sido observado que a etapa de atrição e a adição do espumante eram favoráveis aos valores das variáveis de processo. Isso ocorre porque a atrição provoca a limpeza da superfície da partícula como já mencionado e o espumante faz com que haja a formação de mais bolhas no processo, servindo como um auxiliar no processo de flotação, deixando a partícula mais hidrofóbica, trazendo mais estabilidade nos testes.

Ao compararmos os testes com o coletor A e as condições utilizadas em cada um deles, observa-se que o segundo e o último teste, apresentaram os melhores resultados dentre os analisados, mas analisando de forma econômica, o segundo teste, apresentou melhores resultados, tanto pelo o uso de uma menor dosagem de coletor e a não utilização do espumante como um auxiliar na flotação de espuma e também tendo um menor teor de lítio no rejeito deixando o processo mais eficiente.

No Apêndice B, são encontrados todos os testes que compõem os resultados da Tabela 5 e as condições que foram usados para cada teste.

5.2 Coletor B

Os testes realizados com o coletor B, como pode ser observado pela Tabela 6, também foram conduzidos com o pH básico, com o valor de 10, igual aos testes com o coletor A, por apresentarem características físico-químicas muito parecidas.

Tabela 6 – Testes com o coletor B.

Teste	Condições				Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	Dosagem coletor (g/ton)	pH	Atrição	Espumante				
1	1000	10	não	não	5,11 ± 0,27	0,25 ± 0,06	17,23 ± 3,12	72,35 ± 8,43
2	800	10	não	não	4,61 ± 0,28	0,22 ± 0,05	21,05 ± 2,27	79,38 ± 3,63
3	800	10	não	sim	5,66 ± 0,43	0,60 ± 0,11	9,69 ± 1,35	49,30 ± 5,54
4	800	10	sim	sim	6,27 ± 0,13	0,32 ± 0,06	12,60 ± 0,63	71,52 ± 4,90
5	600	10	não	não	4,65 ± 0,15	0,24 ± 0,03	18,18 ± 0,74	73,26 ± 1,36
6	600	10	sim	sim	6,32 ± 0,08	0,25 ± 0,04	12,92 ± 0,56	77,93 ± 3,50

Fonte: Do autor (2022).

O primeiro teste com o coletor B, como pode ser observado na tabela acima, usou uma dosagem de 1000 g/ton, que ao analisar seus resultados podemos observar que nessa condição as recuperações ficaram acima das de projeto e obteve-se também um bom resultado para o teor de rejeito, mas em compensação, o teor de concentrado ficou abaixo do projetado para a planta industrial que é de 5,50%, e a recuperação metalúrgica ficou alta pelo fato da recuperação mássica também ter ficado alta, pois são diretamente proporcionais, como pode ser observado pela Equação 2 para o cálculo para recuperação mássica.

Tendo em vista buscar as melhores condições do processo e a realização de mais testes em escala de bancada, foram realizados mais testes com menor dosagem de coletor.

Como pode ser observado na Tabela 6, foi utilizada uma dosagem de 800 g/ton do coletor B no segundo teste, que ao compararmos com o teste anterior obteve melhores resultados tanto nas recuperações quanto em relação ao teor de rejeito. No entanto, a diminuição da dosagem de coletor diminuiu o teor de concentrado, o que é uma desvantagem. Uma das causas dessa piora no teor do concentrado pode ser o arraste de outros minerais pela flotação, devido à alta concentração de coletor no meio, diminuindo sua seletividade, com isso obteve um aumento da recuperação mássica e diminuição do teor do minério de interesse a ser concentrado.

Já o terceiro teste, ao compararmos com o teste anterior, observamos que com a adição do espumante o teor de concentrado melhorou, mas nos resultados de rejeito *rougher* e das

recuperações mássicas e metalúrgicas obteve resultados não satisfatórios para as condições impostas. Sendo esses resultados insatisfatórios para os parâmetros para qual a planta foi projetada, uma das hipóteses para tal ocorrido é que o espumante ajudou na flotação do minério, elevando o teor do concentrado e rejeito, e como consequência a diminuição das recuperações.

Com a tentativa de melhorar os resultados usando a mesma dosagem do coletor B dos dois últimos testes apresentados anteriormente, foi feita a atrição química do minério e também a dosagem de espumante, como apresentado no quarto teste da Tabela 6. Analisando os resultados desse teste, pode-se observar melhores resultados que os testes anteriores com a mesma dosagem de coletor, tanto em teores quanto nas recuperações, ficando acima do projetado. Podemos justificar o fato pelo uso da atrição, que possibilitou uma maior aderência do coletor a partícula de interesse e o uso do espumante como auxiliar na flotação, dando mais estabilidade na formação das bolhas no processo.

Ainda na tentativa de otimizar a dosagem do coletor B, foi feita a redução na dosagem do mesmo, como pode ser observado no quinto teste, ao qual foi utilizado uma dosagem de 600 g/ton de coletor. Ao compararmos com os outros testes em que foi feita somente a dosagem do mesmo coletor, obtiveram resultados parecidos em todos os resultados, principalmente o segundo teste, apresentando boas recuperações e baixo teor de rejeito, mas um teor de concentrado bem baixo, o que não satisfaz os objetivos deste projeto.

Tendo em vista os resultados do teste anterior, foi realizado um novo teste com a mesma dosagem de coletor, mas adotando a atrição e a dosagem de espumante, como pode ser observado no sexto teste. Comparando com os resultados apresentados no quinto teste, observa-se nessas condições melhores resultados em relação aos teores e as recuperações.

Com as análises dos resultados dos testes com o coletor B, podemos observar que os testes com a dosagem de 800 e 600 g/ton de coletor com as condições estabelecidas como a atrição e a dosagem de espumante, representados pelos testes 4 e 6, foram os que obtiveram melhores resultados. No entanto, entre esses dois testes o teste 6 apresentou melhores resultados, tendo um teor de rejeito baixo, o de concentrado acima de 5,50% e os de recuperações mássicas e metalúrgica também acima do valor de projeto, mas sendo necessário o uso de espumante e da atrição, além da utilização de uma menor dosagem de coletor.

No Apêndice C, são encontrados todos os testes que compõem os resultados da Tabela 6 e as condições que foram usados para cada teste.

5.3 Coletor C

Os testes com esse terceiro coletor foram realizados com pH neutro, com valores em 7 e alguns testes com pH 8. Foi escolhido trabalhar com esse valor de pH, devido ao coletor ser também um ácido graxo e apresentar alto grau de pureza em sua formulação, não sendo necessário em muitos casos fazer o uso da saponificação. Os testes com o coletor C, estão apresentados na Tabela 7, bem as condições que foram usadas em cada teste.

Tabela 7 – Testes com o coletor C.

Teste	Condições				Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	Dosagem coletor (g/ton)	pH	Atrição	Espumante				
1	700	neutro	não	não	5,39 ± 0,42	0,40 ± 0,12	13,40 ± 2,68	63,08 ± 10,06
2	700	neutro	sim	não	5,40 ± 0,19	0,34 ± 0,16	13,82 ± 2,10	68,58 ± 12,36
3	700	neutro	não	sim	4,77 ± 0,36	0,27 ± 0,08	18,87 ± 2,35	75,53 ± 6,51
4	500	8	não	sim	5,50 ± 0,54	0,25 ± 0,06	15,21 ± 0,92	77,39 ± 6,08
5	500	neutro	não	sim	5,03 ± 0,42	0,38 ± 0,11	12,27 ± 3,01	60,78 ± 14,74
6	500	neutro	sim	não	6,12 ± 0,13	0,33 ± 0,05	14,02 ± 1,43	72,30 ± 5,79
7	500	neutro	sim	sim	5,72 ± 0,43	0,21 ± 0,05	18,37 ± 4,13	82,16 ± 5,96

Fonte: Do autor (2022).

Para a realização do primeiro teste, foi usado uma dosagem de 700 g/ton do coletor C com o pH neutro, como pode ser visto na Tabela 7. Ao analisar os dados abaixo, observa-se que para a dosagem referida de coletor, o teste apresentou uma recuperação mássica acima de 12%, o qual é o valor de referência, apresentado também um valor médio de recuperação metalúrgica igual ao de projeto que é de 63%. Já o valor médio do concentrado, obteve resultado abaixo do de referência, tendo um alto valor de rejeito.

No segundo teste usando o coletor C, foi utilizado a mesma dosagem de coletor e pH que o teste anterior, mas fazendo o uso da atrição nos mesmos. Ao analisa-los, pode-se observar que não houve muita alteração dos resultados obtidos em relação ao teste anterior, com as condições impostas.

Já o terceiro teste, foi também utilizado as mesmas condições que o primeiro teste, mas a diferença é que foi utilizado espumante no processo de flotação, como pode ser observado pela Tabela 7. Pode-se observar que a adição do espumante levou a um aumento em relação as recuperações e uma diminuição considerável em relação aos teores de concentrado e rejeito. Isso é considerado favorável para teor de rejeito, pois tem-se uma pequena perda de lítio no processo, mas desfavorável para o teor de concentrado, tendo seu valor abaixo do esperado de

5,50%, ao qual pode ser explicado pelo arraste de outros minerais e particulado fino ou lama no meio pelo excesso de coletor e a combinação com o espumante, fazendo com que a recuperação mássica aumente e o teor do concentrado diminua.

O quarto teste, foi feito com condições diferentes das dos testes anteriores, com uma dosagem de 500 g/ton do coletor C, pH 8 e uso de espumante na flotação. Ao observar os dados, temos que os valores médios ficaram dentro do projetado para a planta industrial, onde temos que o teor de rejeito ficou bem abaixo, tendo pouca perda no processo e o teor de concentrado ficou igual ao esperado. Já as recuperações mássicas e metalúrgicas ficaram bem acima dos valores de projeto fazendo com que o teste possa ser viabilizado.

O quinto teste foi feito em condições análogas ao anterior, somente sem o uso de modificadores de pH, sendo esse teste realizado com o pH neutro, como apresentado pela Tabela 7. Ao fazermos a comparação com o teste anterior, observa que somente a recuperação mássica média do teste ficou acima do projetado, tendo os outros valores abaixo do objetivo para a produção industrial. Com isso, conclui-se que para o coletor C, a saponificação ajuda na eficácia desse coletor, fazendo-se necessária.

Já o sexto teste, apresenta os resultados com uma dosagem de 500 g/ton do coletor mais a atrição do material e o pH neutro. Esse teste apresentou resultados semelhantes ao segundo teste, o qual foi feito com uma dosagem de 700 g/ton de coletor. No entanto, ao analisarmos os resultados, temos que esse teste apresentou melhores resultados, tendo um aumento nas recuperações e no teor de concentrado. Essa dosagem menor de coletor e a obtenção de resultados melhores, coloca em prática a otimização do processo com menos gasto de coletor e também em evitar o arraste de outros minerais indesejados pelo excesso de coletor.

O último teste com o coletor C, como ser visto pela Tabela 7, em que em relação ao teste anterior, há a adição da etapa do uso do espumante como um auxiliar da flotação, ajudando na estabilidade das bolhas. Ao analisarmos os resultados desse teste, podemos observar que o mesmo também apresentou uma grande estabilidade nos resultados, tendo um teor médio de rejeito bem baixo, que como já citado anteriormente, deixa o processo mais eficiente perdendo pouco material. O teor de concentrado, também ficou acima do objetivo que é de 5,50%, as recuperações apresentaram ótimos resultados bem acima do objetivo, de 12% para mássica e de 63% para a metalúrgica.

Ao analisar todos os resultados dos testes feitos com esse coletor e as condições usadas em cada, temos três possibilidades para testes industriais, que são os testes 4, 6 e 7, que tem em comum a dosagem de 500 g/ton do coletor. No entanto, entre todos os testes, destaca-se o teste 7, que apresentou um menor teor de rejeito e com pouco desvio pela alta variabilidade do teor

de alimentação. Além disso, essas condições apresentam resultados bem superiores em relação ao esperado para as recuperações e teor do minério de interesse no concentrado, que são de 12%, 63% e 5,50% respectivamente. Com isso, conclui-se que para o Coletor C, o uso com uma dosagem de 500 g/ton, em pH neutro, com atrição e adição do espumante favorecem os resultados quanto aos valores de projeto.

Podemos destacar também esse último teste, que o mesmo apresenta resultados satisfatórios devido a sua alta variabilidade no teor de alimentação, principalmente acima de 1,5%, pois futuramente a planta industrial receberá esse teor de alimentação no processo de flotação – teste esse apresentado no Apêndice D, Tabela 34.

No Apêndice D, são encontrados todos os testes que compõem os resultados da Tabela 7 e as condições que foram usados para cada teste.

5.4 Coletor D

O coletor D tem características físico-químicas bem parecidas com o coletor C. Por isso os testes com esse coletor foram feitos somente com a dosagem de 500 g/ton, variando somente as condições adotadas em cada um, como pode ser visto pela Tabela 8.

Tabela 8 – Testes com o coletor D.

Teste	Condições				Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	Dosagem coletor (g/ton)	pH	Atrição	Espumante				
1	500	8	não	não	5,74 ± 0,43	0,58 ± 0,21	7,71 ± 2,88	44,38 ± 19,67
2	500	neutro	não	sim	5,38 ± 0,30	0,24 ± 0,04	14,65 ± 1,45	75,56 ± 4,53
3	500	neutro	sim	sim	5,95 ± 0,18	0,24 ± 0,09	15,28 ± 1,51	80,22 ± 7,06

O primeiro teste com o coletor D, como apresentado pela Tabela 8, foi alterado somente o pH nas etapas de flotação, com o valor de 8. De acordo com os resultados apresentados, podemos notar que o teste apresentou um resultado bom para o teor de concentrado. Mas para o teor de rejeito e de recuperações, essas condições não foram satisfatórias para com os objetivos da planta.

O segundo teste, teve como condições o uso de espumante e o pH neutro. Nessas condições, observou-se que somente o teor de lítio no concentrado não teve seu resultado médio alcançado. Uma possível justificativa seria que o espumante estabilizou as bolhas de ar, fazendo também o arraste de outros tipos de substâncias, como material fino ou lama para o concentrado.

Isso fez com que se tivesse um menor teor no concentrado final, aumentando assim a recuperação mássica e como consequência o aumento da recuperação metalúrgica.

Tendo em vista os resultados dos testes apresentados anteriormente e os resultados dos testes com o coletor C, foi usada as mesmas condições do último teste com o coletor C, representado pelo teste 7 na Tabela 7. Neste teste foi feito o uso da atrição para limpeza da superfície da partícula, uso do espumante para estabilizar as bolhas e também o pH neutro na flotação. Esse teste apresentou resultado satisfatório para todas as análises de objetivo deste trabalho, com o teor de concentrado acima de 5,50% e os de recuperações mássica e metalúrgica também acima de 12% e 63%, respectivamente.

Para o coletor D pode-se observar que só houveram resultados satisfatórios para as condições apresentadas no último teste, com o uso da atrição para a limpeza da superfície da partícula, o uso do espumante como um auxiliar na flotação e estabilidade das bolhas e não utilização de modificadores de pH.

No Apêndice E, são encontrados todos os testes que compõem os resultados da Tabela 8 e as condições que foram usados para cada teste.

Tendo em vista todos os resultados e as condições impostas em cada teste, a Tabela 9 apresenta os testes que obtiveram os melhores resultados para cada coletor.

Com isso, podemos concluir que os melhores resultados se deram nos testes em que foi feita a atrição química do material, pois o mesmo ajuda na limpeza da superfície da partícula, fazendo com que impurezas como lamas, materiais finos ou outros sejam eliminadas da superfície da partícula. Dessa forma, é elevada a aderência dos coletores a superfície do minério, tornando essa partícula mais hidrofóbica e suscetível a flotação.

Tabela 9 – Melhores testes com cada coletor.

	Coletor A (Teste 2)	Coletor B (Teste 6)	Coletor C (Teste 7)	Coletor D (Teste 3)
Condições	500 g/ton + atrição + pH 10	600 g/ton + atrição + espumante + pH 10	500 g/ton + atrição + espumante + pH neutro	500 g/ton + atrição + espumante + pH neutro
Alimentação (%)	1,03 ± 0,09	1,05 ± 0,03	1,26 ± 0,20	1,13 ± 0,05
Concentrado (%)	5,72 ± 0,67	6,32 ± 0,08	5,72 ± 0,43	5,95 ± 0,18
Rejeito (%)	0,22 ± 0,08	0,25 ± 0,04	0,21 ± 0,05	0,24 ± 0,09
Rec. Mássica (%)	14,24 ± 1,97	12,92 ± 0,56	18,37 ± 4,13	15,28 ± 1,51
Rec. Metalúrgica (%)	78,40 ± 6,59	77,93 ± 3,50	82,16 ± 5,96	80,22 ± 7,06

Fonte: Do autor (2022).

O uso do espumante também se fez necessário na maioria dos testes como pode ser observado na Tabela 9 com os melhores resultados de cada coletor. É válido lembrar que mesmo para o coletor A, em que o espumante foi usado no teste apresentado na Tabela 5, o uso do espumante ajudou no processo de flotação, trazendo mais estabilidade na formação das bolhas, sendo considerado um *promoter* nesse processo.

6 CONCLUSÕES

Em suma, o presente trabalho apresentou a avaliação de diferentes coletores, bem como as condições a serem impostas para que cada um apresente o seu melhor desempenho na flotação de espuma em bancada. Foram avaliados os teores de concentrado e rejeito, as recuperações mássicas e metalúrgicas do Lítio, a fim de futuramente os mesmos serem usados na produção industrial com melhores desempenhos.

Para todos os coletores, a atrição do minério se mostrou uma etapa importante para o condicionamento do material a ser flotado. O espumante, também se mostrou, independente do tipo de coletor, ser um agente favorável à formação da espuma e estabilização dessas.

Em relação à dosagem, observou-se que os coletores A, C e D na dosagem de 500 g/ton apresentaram os melhores resultados, com exceção do coletor B, que apresentou resultados mais satisfatórios com uma dosagem de 600 g/ton de coletor, mas podendo ser feitos futuros testes com o coletor B na dosagem de 500 g/ton e avaliar seus resultados.

Os coletores A e B tem suas características físico-químicas bem parecidas, fazendo necessário o uso da saponificação desses coletores no condicionamento, através do uso de modificadores de pH, uma vez que em suas formulações esses coletores apresentam vários compostos que os tornam mais impuros. Já os coletores C e D também apresentam características bem comuns entre si, não sendo necessário o emprego da saponificação do coletor, por serem coletores mais puros e com menos compostos em sua formulação. Esses dois últimos apresentaram resultados satisfatórios com o uso de pH neutro.

No entanto, o teste 7 com o coletor C, foram realizados testes com um teor mais alto de alimentação, acima de 1,5%. Essa condição, será uma realidade futura da planta. Pode-se observar que o coletor C apresentou resultados satisfatórios para essa variabilidade na alimentação, com teores de concentrado e rejeito, e recuperações mássicas e metalúrgicas, em conformidade com o esperado pela empresa. Com isso, esse coletor se apresenta como um futuro coletor que pode ser usado pela empresa, cabendo estudos que viabilizem a sua utilização.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ANDRADE, F. S. **Influência da Velocidade de Rotação do Impelidor na Flotação de Minério Fosfático**. 2014. Monografia (Especialização em Tratamento de Minérios) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014.
- BARROW, J. D. **Advances in Astronomy**. From the Big Bang to the Solar System. London, v.1, 8 p., 2005.
- BATISTA, C. Reação de Saponificação. **Toda Matéria**, Pernambuco, 2018. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/reacao-saponificacao/>. Acessado em: 10 ago. 2022.
- BIANCHETTI, M. AMG investirá R\$ 1,2 bi em planta de lítio em Minas Gerais. **Diário do Comércio**, Belo Horizonte, Minas Gerais, 13 maio 2022. Economia. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/amg-investira-r-12-bi-em-planta-de-litio-em-minas-gerais/>. Acessado em: 12 ago. 2022.
- BORGES, Edson Aparecido Gonçalves. **Extração de Lítio nos Municípios de Itinga e Araçuaí no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade Presidente Antônio Carlos, Teófilo Otoni, 2019.
- BRAGA, A. S. **Cinética de flotação de silicatos: macro e micro abordagem**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- BRAGA, P. F. A.; FRANÇA, S. C. A. **Lítio: um mineral estratégico**. 2013.
- BRAGA, P.F.A., FRANÇA, S.C.A., CELINO, E.A.B. **Lítio, uma visão atualizada do mercado mundial**. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. Goiânia, 2013.p. 1-8
- BROWN, T. et al. **Lithium: Definitions, mineralogy and deposits**. British Geological Survey. 2016.
- BULATOVIC, S. M. **Handbook of flotation reagents – Chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. 446p.
- CARVALHO, N. L. N. **Avaliação de Coletores e Depressores na Flotação do Minério Sulfetado de Chumbo e Zinco de Morro Agudo**. 2018. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- CHAGAS, C. S; CORRÊA, T. H. B. As contribuições Científicas de José Bonifácio e a Descoberta do Lítio: Um Caminhar pela História da Ciência. **Revista de Educação, Ciências e Matemática**, Rio de Janeiro, v.7, n.1, p. 201-212, 2017.
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2006. 1. ed, v. 4. São Paulo: Signus Editora, 2006.
- CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. **Flotação**. 2010. In: Da Luz, A. B.; Sampaio, J.A.; França, S.C.A. (Ed(s)). Tratamento de Minérios – 5ª Edição. Rio de Janeiro CETEM/MCT, 2010. P 399-457.

DELGADO, Fernanda; STIER, Klaus Alexander de Freitas; CAMPOS, Casemiro. **América do Sul no cerne da geopolítica dos renováveis: o caso do lítio**. 2018.

GEOSCAN. **Lavra na Mineração**: Entenda o que é e seus métodos. Geoscan – Geologia e Geofísica, 2020. Disponível em: <https://www.geoscan.com.br/blog/lavra-na-mineracao/>. Acessado em: 02 ago. 2022.

GUIMARÃES, G. C. **Flotação de diferentes tipologias de minério fosfático de Tapira/MG**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

LIMA, N. P.; VALADÃO, G. E. Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, p. 473-477, 2008.

LOPES, M. M. **Lítio - Características, Ocorrência, Produção e Uso**. 1990. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2019.

LUZ, A. B. (Ed.); SAMPAIO, J. A. (Ed.); ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de Minérios** 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MAMEDE, C. R. S. **Mitigação dos efeitos de cátions Ca^{2+} na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MAPA, P. S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MEDEIROS, A. R. S. **Alternativas para otimização do processo de beneficiamento de caulim da Região Seridó dos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte**. 2022. Tese (doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MENDES, M. T. S. **Perfil Econômico do Lítio nos Países Sulamericanos e Consumo Mundial**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, Rio Claro, 2009.

MENDES, Marcos Vinicius Agapito et al. **Flotação de silicatos**. HOLOS, v. 3, p. 46-56, 2018.

MINING JOURNAL. **Strategic Metals: Common attributes**. Disponível em: <https://www.mining-journal.com/leadership/news/1161626/strategic-metals-common-attributes>. apr. 2012. Acessado em: 10 agost. 2022.

OLIVEIRA, J. A. **Grau de saponificação de óleos vegetais na flotação seletiva de apatita de minério carbonatítico**. 2005. Dissertação (mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

OLIVEIRA, J. F. **Setor mineral: tendências tecnológicas**. Texto elaborado para o projeto Setor Mineral - Tendências Tecnológicas, do Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. 2006

QUEIROZ, L. A. **Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios Itabiríticos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

RODRIGUES, Bernardo Salgado; PADULA, Raphael. Geopolítica do lítio no século XXI. **AUSTRAL: Brazilian Journal of Strategy & International Relations**, v. 6, n. 11, 2017.

ROJAS, R. H. et al. **Reaproveitamento de Rejeitos de Minério de Ferro por Flotação Direta Usando uma Mistura de Ácidos Graxos**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, XXVIII, 2019, Belo Horizonte.

SALOMÃO, P. E. A.; BORGES, E. A. G. Extração de Lítio nos municípios de Itinga e Araçuaí no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais. **Research, Society and Development**, v. 9, n.1, 15 p., 2020.

SOARES, J. C. M. L. **Efeito da Granulometria da Alimentação na Flotação de Espodumênio**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

WILLS, B.A.; FINCH, J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. ButterworthHeinemann. Eighth Edition, 2015.

APÊNDICE A – Cinéticas de flotação

Tabela 10 – Coletor A, 600 g/ton, pH 10, atrição, espumante.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,27	100%
Concentrado (1min)	10,23%	5,45	43,82%
Concentrado (2min)	4,89%	4,47	17,18%
Concentrado (3min)	3,17%	3,29	8,20%
Concentrado (4min)	1,66%	2,37	3,09%
Concentrado (5min)	1,31%	1,89	1,94%
Concentrado (7min)	1,92%	1,47	2,22%
Rejeito Rougher	76,82%	0,39	23,55%
1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,20	100%
Concentrado	10,23%	5,45	46,49%
Rejeito	89,77%	0,71	53,51%
2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,71	100%
Concentrado	5,45%	4,47	34,16%
Rejeito	94,55%	0,50	65,84%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,50	100%
Concentrado	3,73%	3,29	24,57%
Rejeito	96,27%	0,39	75,43%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,39	100%
Concentrado	2,03%	2,37	12,21%
Rejeito	97,97%	0,35	87,79%
5 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,35	100%
Concentrado	1,63%	1,89	8,73%
Rejeito	98,37%	0,33	91,27%
7 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,42	100%
Concentrado	2,44%	1,47	8,63%
Rejeito	97,56%	0,39	91,37%

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 11 – Coletor B, 1000g/ton, pH 10.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,22	100%
Concentrado (1min)	13,50%	6,04	66,89%
Concentrado (2min)	3,81%	4,56	14,26%
Concentrado (3min)	2,14%	2,63	4,61%
Concentrado (4min)	1,25%	1,83	1,88%
Concentrado (5min)	1,10%	1,39	1,25%
Concentrado (7min)	1,15%	1,06	1,00%
Rejeito Rougher	77,05%	0,16	10,11%
1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,16	100%
Concentrado	13,50%	6,04	70,02%
Rejeito	86,50%	0,40	29,98%
2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,42	100%
Concentrado	4,41%	4,56	47,78%
Rejeito	95,59%	0,23	52,22%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,24	100%
Concentrado	2,58%	2,63	28,65%
Rejeito	97,42%	0,17	71,35%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,18	100%
Concentrado	1,55%	1,83	16,07%
Rejeito	98,45%	0,15	83,93%
5 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,15	100%
Concentrado	1,38%	1,39	12,58%
Rejeito	98,62%	0,14	87,42%
7 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,17	100%
Concentrado	1,48%	1,06	9,03%
Rejeito	98,52%	0,16	90,97%

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 12 – Coletor B, 600g/ton, pH 10, atrição, espumante.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,16	100%
Concentrado (1min)	7,52%	4,7	30,56%
Concentrado (2min)	4,91%	4,81	20,40%
Concentrado (3min)	4,00%	4,58	15,85%
Concentrado (4min)	3,66%	3,73	11,81%
Concentrado (5min)	2,34%	2,48	5,02%
Concentrado (7min)	3,61%	1,35	4,21%
Rejeito Rougher	73,95%	0,19	12,14%
1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,10	100%
Concentrado	7,52%	4,7	32,25%
Rejeito	92,48%	0,80	67,75%
2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,79	100%
Concentrado	5,31%	4,81	32,21%
Rejeito	94,69%	0,57	67,79%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,58	100%
Concentrado	4,57%	4,58	36,38%
Rejeito	95,43%	0,38	63,62%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,40	100%
Concentrado	4,38%	3,73	40,89%
Rejeito	95,62%	0,25	59,11%
5 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,26	100%
Concentrado	2,93%	2,48	28,36%
Rejeito	97,07%	0,19	71,64%
7 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,24	100%
Concentrado	4,65%	1,35	25,73%
Rejeito	95,35%	0,19	74,27%

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 13 – Coletor C, 700g/ton, pH neutro.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,97	100%
Concentrado (1min)	7,27%	3,13	23,50%
Concentrado (2min)	3,98%	3,24	13,31%
Concentrado (3min)	3,19%	3,42	11,26%
Concentrado (4min)	2,79%	3,38	9,75%
Concentrado (5min)	2,09%	3,18	6,86%
Concentrado (7min)	2,47%	3,07	7,84%
Rejeito Rougher	78,22%	0,34	27,48%
1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,91	100%
Concentrado	7,27%	3,13	24,88%
Rejeito	92,73%	0,74	75,12%
2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,72	100%
Concentrado	4,29%	3,24	19,18%
Rejeito	95,71%	0,61	80,82%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,61	100%
Concentrado	3,59%	3,42	20,22%
Rejeito	96,41%	0,50	79,78%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,51	100%
Concentrado	3,26%	3,38	21,83%
Rejeito	96,74%	0,41	78,17%
5 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,41	100%
Concentrado	2,52%	3,18	19,39%
Rejeito	97,48%	0,34	80,61%
7 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,41	100%
Concentrado	3,06%	3,07	22,20%
Rejeito	96,94%	0,34	77,80%

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 14 – Coletor C, 500g/ton, pH neutro, atrição, espumante.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,16	100%
Concentrado (1min)	12,41%	5,52	59,04%
Concentrado (2min)	2,91%	4,65	11,65%
Concentrado (3min)	1,37%	3,79	4,47%
Concentrado (4min)	0,98%	3,01	2,53%
Concentrado (5min)	0,69%	2,45	1,45%
Concentrado (7min)	0,84%	1,87	1,35%
Rejeito Rougher	80,82%	0,28	19,51%

1 min			
Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,10	100%
Concentrado	12,41%	5,52	62,20%
Rejeito	87,59%	0,48	37,80%

2 min			
Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,48	100%
Concentrado	3,32%	4,65	31,94%
Rejeito	96,68%	0,34	68,06%

3 min			
Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,34	100%
Concentrado	1,62%	3,79	17,76%
Rejeito	98,38%	0,29	82,24%

4 min			
Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,29	100%
Concentrado	1,17%	3,01	12,12%
Rejeito	98,83%	0,26	87,88%

5 min			
Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,26	100%
Concentrado	0,83%	2,45	7,83%
Rejeito	99,17%	0,24	92,17%

7 min			
Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,30	100%
Concentrado	1,03%	1,87	6,48%
Rejeito	98,97%	0,28	93,52%

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 15 – Coletor D, 500g/ton, pH neutro, espumante.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,98	100%
Concentrado (1min)	13,05%	4,63	61,88%
Concentrado (2min)	3,55%	3,68	13,40%
Concentrado (3min)	2,52%	2,33	6,02%
Concentrado (4min)	1,82%	1,65	3,07%
Concentrado (5min)	1,92%	1,06	2,08%
Concentrado (7min)	3,06%	0,69	2,16%
Rejeito Rougher	74,07%	0,15	11,38%
1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,93	100%
Concentrado	13,05%	4,63	65,12%
Rejeito	86,95%	0,37	34,88%
2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,38	100%
Concentrado	4,09%	3,68	39,39%
Rejeito	95,91%	0,24	60,61%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,25	100%
Concentrado	3,03%	2,33	28,49%
Rejeito	96,97%	0,18	71,51%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,19	100%
Concentrado	2,25%	1,65	19,91%
Rejeito	97,75%	0,15	80,09%
5 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,15	100%
Concentrado	2,43%	1,06	16,62%
Rejeito	97,57%	0,13	83,38%
7 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,17	100%
Concentrado	3,97%	0,69	15,98%
Rejeito	96,03%	0,15	84,02%

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 16 – Coletor D, 500g/ton, pH neutro, atrição, espumante.

Amostra	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,14	100%
Concentrado (1min)	16,60%	5,35	77,81%
Concentrado (2min)	2,30%	3,67	7,38%
Concentrado (3min)	1,19%	1,71	1,78%
Concentrado (4min)	0,85%	0,96	0,72%
Concentrado (6min)	1,29%	0,65	0,74%
Rejeito Rougher	77,77%	0,17	11,58%
1 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	1,10	100%
Concentrado	16,60%	5,35	80,79%
Rejeito	83,40%	0,25	19,21%
2 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,27	100%
Concentrado	2,75%	3,67	38,06%
Rejeito	97,25%	0,17	61,94%
3 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,17	100%
Concentrado	1,46%	1,71	14,59%
Rejeito	98,54%	0,15	85,41%
4 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,15	100%
Concentrado	1,06%	0,96	6,84%
Rejeito	98,94%	0,14	93,16%
6 min			
	Rec. Más. (%)	Concentrado (%)	Rec. Met. (%)
Alimentação	100,00%	0,18	100%
Concentrado	1,64%	0,65	5,98%
Rejeito	98,36%	0,17	94,02%

Fonte: Do autor (2022).

APÊNDICE B – Testes coletor A

Tabela 17 – Teste coletor A com 500g/ton.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 500 g/ton	0,86	4,81	0,52	7,39	41,47
	0,89	5,58	0,48	7,65	47,83
	0,96	5,02	0,25	14,31	74,68
	0,97	5,36	0,33	11,83	65,60
	1,01	5,69	0,66	6,31	35,42
	1,02	6,64	0,44	8,80	57,25
	1,04	6,21	0,36	10,98	65,70
	1,05	5,89	0,50	9,76	54,51
	1,07	6,25	0,71	5,91	34,38
	1,09	6,47	0,47	9,94	59,02
	1,15	6,03	0,26	12,26	64,05
	1,15	6,95	0,35	11,45	68,99
	1,15	6,64	0,42	11,47	66,21
Média	1,03	5,96	0,44	9,85	56,55
Desvio	0,07	0,53	0,11	2,04	10,63

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 18 – Teste coletor A com 500 g/ton e atrição.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)	
- Dosagem de coletor 500 g/ton	0,83	4,66	0,12	15,25	85,34	
	0,87	5,21	0,29	11,33	68,06	
	0,91	4,74	0,12	16,30	84,73	
	0,97	4,99	0,14	16,57	85,00	
	1,00	5,54	0,28	13,30	73,54	
	1,01	5,50	0,12	16,04	87,04	
	1,03	6,08	0,19	13,75	81,40	
	1,08	6,33	0,24	13,33	78,04	
	- Atrição	1,09	6,54	0,32	11,59	69,83
		1,11	6,18	0,42	11,34	63,20
		1,13	6,71	0,20	13,77	81,84
		1,15	5,00	0,16	19,86	86,27
		1,17	6,85	0,30	12,74	74,88
Média	1,03	5,72	0,22	14,24	78,40	
Desvio	0,09	0,67	0,08	1,97	6,59	

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 19 – Teste coletor A com 600 g/ton.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 600 g/ton	0,79	5,28	0,49	5,80	38,69
	0,88	5,18	0,52	7,22	42,67
	0,91	5,23	0,66	5,00	28,81
	0,94	4,67	0,34	12,73	63,24
	0,95	5,33	0,44	9,04	50,92
	0,98	5,54	0,47	8,05	45,29
	0,98	5,52	0,65	6,39	35,95
	1,00	5,58	0,54	8,02	44,59
	1,02	5,73	0,42	10,24	57,52
	1,03	5,72	0,66	6,22	34,41
	1,09	6,00	0,58	8,87	48,70
	1,09	5,00	0,50	10,43	48,04
	1,10	6,52	0,77	5,18	30,69
	1,11	5,18	0,68	9,08	42,35
	1,13	6,29	0,62	8,53	47,65
	1,13	4,54	0,54	12,96	51,89
	1,14	5,42	0,69	8,59	40,90
	1,15	6,19	0,91	4,20	22,62
	1,15	6,07	0,72	7,55	40,02
	1,16	4,99	0,17	19,94	58,68
1,19	4,49	0,21	22,29	84,23	
1,27	4,18	0,40	22,15	72,64	
Média	1,05	5,39	0,54	9,93	46,84
Desvio	0,10	0,48	0,14	3,75	10,46

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 20 – Teste coletor A com 600 g/ton e dosagem de espumante.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	0,94	5,26	0,62	5,63	31,49
	0,99	5,78	0,24	12,99	75,75
	1,04	5,08	0,55	10,25	49,89
	1,05	5,15	0,54	9,97	48,88
	1,06	6,00	0,54	8,96	50,94
	1,07	4,57	0,23	18,73	79,67
- Dosagem de coletor 600 g/ton	1,08	5,53	0,19	16,22	83,31
	1,08	5,78	0,51	10,44	55,82
	1,09	6,48	0,51	9,57	56,69
- Espumante	1,11	5,26	0,61	10,36	49,04
	1,12	5,98	0,36	12,93	69,13
	1,13	5,13	0,62	10,75	48,89
	1,13	6,16	0,39	12,51	68,00
	1,14	5,05	0,44	14,25	63,18
	1,16	5,28	0,61	10,99	50,11
	1,17	6,59	0,38	12,49	70,10
	1,37	6,52	0,69	11,08	52,88
Média	1,10	5,62	0,47	11,65	59,05
Desvio	0,06	0,51	0,13	2,18	11,27

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 21 – Teste coletor A com 600 g/ton, atrição e dosagem de espumante.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	1,01	6,24	0,25	12,42	76,00
	1,02	5,72	0,53	9,15	51,21
	1,03	5,06	0,17	17,32	84,90
	1,03	4,64	0,27	16,59	75,06
	1,05	6,49	0,40	10,36	64,14
	1,05	5,59	0,20	15,43	82,29
	1,08	6,35	0,28	12,60	73,85
	1,08	5,17	0,21	17,09	81,82
	1,08	4,57	0,17	20,11	85,17
	1,08	6,35	0,30	12,60	73,85
	1,08	5,17	0,21	17,09	81,82
- Dosagem de coletor 600 g/ton	1,08	4,57	0,17	20,11	85,17
	1,11	5,90	0,23	15,04	80,20
	1,17	6,00	0,16	16,79	85,83
	1,19	5,13	0,15	20,65	88,76
- Atrição	1,19	5,66	0,21	17,44	82,96
	1,21	5,98	0,31	15,57	76,98
- Espumante	1,29	6,36	0,45	13,68	67,55
	1,29	6,46	0,62	10,76	54,01
	1,33	6,11	0,33	16,24	74,86
	1,36	6,40	0,37	15,46	72,79
	1,37	6,12	0,27	17,93	80,28
	1,43	6,41	0,52	14,36	64,56
	1,43	6,10	0,34	17,41	72,00
	1,49	5,58	0,62	16,64	62,38
	1,56	6,78	0,88	10,42	45,36
	1,59	6,59	0,62	15,11	62,51
	1,72	5,96	0,99	13,48	46,83
	1,92	6,01	0,54	24,00	75,06
Média	1,25	5,84	0,37	15,58	72,70
Desvio	0,19	0,51	0,17	2,57	9,41

Fonte: Do autor (2022).

APÊNDICE C – Testes coletor B

Tabela 22 – Teste coletor B com 1000 g/ton.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 1000g/ton	1,09	5,53	0,36	12,13	61,58
	1,11	5,10	0,38	13,65	62,68
	1,12	4,64	0,16	14,25	59,06
	1,16	4,92	0,19	18,56	78,58
	1,19	5,60	0,20	16,41	77,47
	1,22	5,27	0,26	17,50	75,47
	1,23	4,82	0,21	20,73	81,26
	1,48	4,98	0,24	24,63	82,66
Média	1,20	5,11	0,25	17,23	72,35
Desvio	0,08	0,27	0,06	3,12	8,43

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 23 – Teste coletor B com 800 g/ton.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 800 g/ton	1,21	4,78	0,26	18,88	74,73
	1,21	4,19	0,14	24,45	84,83
	1,22	4,86	0,26	19,81	78,59
Média	1,21	4,61	0,22	21,05	79,38
Desvio	0,00	0,28	0,05	2,27	3,63

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 24 – Teste coletor B com 800 g/ton e espumante.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 800 g/ton	0,97	5,33	0,56	8,10	44,57
	1,04	6,19	0,42	10,14	60,38
	1,18	5,99	0,71	8,57	43,54
- Espumante	1,26	5,14	0,69	11,94	48,72
Média	1,11	5,66	0,60	9,69	49,30
Desvio	0,11	0,43	0,11	1,35	5,54

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 25 – Teste coletor B com 800 g/ton, atrição e espumante.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 800 g/ton	1,04	6,07	0,33	11,66	68,40
	1,08	6,42	0,23	13,31	78,88
- Espumante - Atrição	1,21	6,32	0,40	12,83	67,29
Média	1,11	6,27	0,32	12,60	71,52
Desvio	0,07	0,13	0,06	0,63	4,90

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 26 – Teste coletor B com 600 g/ton.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 600 g/ton	1,14	4,63	0,28	17,53	71,22
	1,16	4,45	0,21	19,28	73,86
	1,16	4,88	0,22	17,72	74,71
Média	1,15	4,65	0,24	18,18	73,26
Desvio	0,01	0,15	0,03	0,74	1,36

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 27 – Teste coletor B com 600 g/ton, atrição e espumante.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 600 g/ton	1,01	6,25	0,27	12,08	74,64
	1,04	6,45	0,18	13,47	83,18
- Espumante - Atrição	1,09	6,27	0,29	13,22	75,97
Média	1,05	6,32	0,25	12,92	77,93
Desvio	0,03	0,08	0,04	0,56	3,50

Fonte: Do autor (2022).

APÊNDICE D – Testes coletor C

Tabela 28 – Teste coletor C com 700 g/ton e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 700 g/ton - pH neutro	0,97	4,86	0,20	15,29	76,58
	1,02	4,40	0,18	18,94	81,52
	1,10	4,83	0,34	16,42	71,90
	1,11	6,07	0,30	12,23	66,79
	1,12	5,15	0,57	10,07	46,34
	1,13	5,88	0,45	10,76	56,01
	1,14	5,35	0,48	12,31	57,86
	1,14	5,97	0,41	11,51	60,11
	1,15	5,20	0,45	13,72	62,30
	1,15	5,43	0,55	10,26	48,44
	1,16	5,90	0,51	10,15	51,51
	1,17	5,24	0,17	18,84	84,70
	1,19	4,97	0,35	17,31	72,46
	1,22	5,79	0,50	12,23	58,28
	1,25	5,84	0,59	10,99	51,40
Média	1,13	5,39	0,40	13,40	63,08
Desvio	0,05	0,42	0,12	2,68	10,06

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 29 – Teste coletor C com 700 g/ton, atrição e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 700 g/ton	1,02	5,22	0,15	16,08	82,54
	1,02	5,28	0,12	16,76	86,68
	1,09	5,27	0,50	11,01	53,16
- Atrição	1,13	5,61	0,45	12,23	60,43
	1,14	5,25	0,53	11,92	55,06
- pH neutro	1,17	5,77	0,27	14,93	73,58
Média	1,10	5,40	0,34	13,82	68,58
Desvio	0,05	0,19	0,16	2,10	12,36

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 30 – Teste coletor C com 700 g/ton, espumante e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 700 g/ton	1,12	4,17	0,14	23,56	87,44
	1,18	5,11	0,23	17,20	74,30
- Espumante	1,20	4,65	0,43	16,39	63,74
- pH neutro	1,23	5,14	0,27	18,31	76,65
Média	1,18	4,77	0,27	18,87	75,53
Desvio	0,03	0,36	0,08	2,35	6,51

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 31 – Teste coletor C com 500 g/ton, espumante e pH8.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 500 g/ton	1,04	6,09	0,24	13,38	78,46
	1,06	5,77	0,17	15,44	84,19
	1,10	5,71	0,21	15,74	81,68
- Espumante - pH 8	1,11	4,43	0,36	16,29	65,24
Média	1,08	5,50	0,25	15,21	77,39
Desvio	0,03	0,54	0,06	0,92	6,08

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 32 – Teste coletor C com 500 g/ton, espumante.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 500 g/ton	0,96	4,69	0,58	9,02	43,84
	0,98	4,96	0,41	8,67	44,03
	0,99	4,69	0,29	15,54	73,92
- Espumante	1,01	4,54	0,32	15,86	71,13
	1,05	5,22	0,47	10,08	50,27
- pH neutro	1,08	6,10	0,20	14,43	81,51
Média	1,01	5,03	0,38	12,27	60,78
Desvio	0,04	0,42	0,11	3,01	14,74

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 33 – Teste coletor C com 500 g/ton, atrição e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 500 g/ton	1,11	6,31	0,37	11,54	65,34
	1,18	5,98	0,32	13,94	70,65
- Atrição	1,21	6,00	0,23	16,87	83,88
- pH neutro	1,22	6,19	0,38	13,71	69,32
Média	1,18	6,12	0,33	14,02	72,30
Desvio	0,04	0,13	0,05	1,43	5,79

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 34 – Teste coletor C com 500 g/ton, atrição, espumante e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	0,95	5,46	0,13	14,55	83,51
	0,97	5,00	0,09	17,52	90,38
	1,01	5,71	0,17	14,09	79,51
	1,04	6,23	0,21	11,90	71,07
	1,04	6,20	0,20	12,35	73,77
	1,05	6,27	0,21	12,76	76,27
	1,05	6,17	0,26	12,65	74,62
	1,09	5,15	0,16	18,43	86,94
	1,09	6,20	0,21	13,64	77,87
- Dosagem de coletor 500 g/ton	1,10	4,65	0,38	16,56	70,00
	1,12	6,31	0,27	13,66	77,27
	1,15	4,82	0,33	17,76	74,60
- Atrição	1,17	6,30	0,31	14,35	77,16
	1,18	5,79	0,22	16,93	82,81
- Espumante	1,20	4,98	0,17	21,16	87,73
	1,27	5,07	0,18	21,69	86,72
- pH neutro	1,29	6,09	0,26	17,15	80,79
	1,29	6,14	0,30	16,02	76,20
	1,36	6,21	0,11	19,97	91,12
	1,43	5,42	0,13	23,87	90,69
	1,46	5,97	0,14	22,20	90,60
	1,51	5,99	0,22	20,47	81,45
	1,52	5,63	0,20	23,03	85,38
	1,53	5,63	0,18	24,12	89,04
	1,89	5,81	0,21	29,35	90,27
	1,92	5,52	0,24	31,47	90,43
Média	1,26	5,72	0,21	18,37	82,16
Desvio	0,20	0,43	0,05	4,13	5,96

Fonte: Do autor (2022).

APÊNDICE E – Testes coletor D

Tabela 35 – Teste coletor D com 500 g/ton e pH 8.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 500 g/ton - pH 8	0,93	5,16	0,54	6,82	37,68
	1,04	6,39	0,30	12,03	73,89
	1,13	5,68	0,90	4,28	21,58
Média	1,03	5,74	0,58	7,71	44,38
Desvio	0,07	0,43	0,21	2,88	19,67

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 36 – Teste coletor D com 500 g/ton, espumante e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
- Dosagem de coletor 500 g/ton	1,00	5,27	0,19	15,74	82,89
	1,00	5,58	0,19	12,66	70,60
	1,04	4,97	0,21	16,90	81,16
	1,04	5,38	0,25	14,30	74,01
- Espumante	1,05	6,08	0,23	13,51	78,51
	1,06	5,54	0,25	13,04	68,55
- pH neutro	1,08	4,83	0,34	16,39	73,23
	Média	1,04	5,38	0,24	14,65
Desvio	0,02	0,30	0,04	1,45	4,53

Fonte: Do autor (2022).

Tabela 37 – Teste coletor D com 500 g/ton, atrição, espumante e pH neutro.

Condições do teste	Alimentação (%)	Concentrado (%)	Rejeito (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalúrgica (%)
	1,06	5,99	0,30	13,35	75,11
	1,07	6,39	0,27	12,73	76,34
	1,08	5,49	0,14	17,42	88,61
- Dosagem de coletor 500 g/ton	1,08	5,94	0,20	15,24	83,43
	1,11	5,66	0,50	11,24	57,19
- Atrição	1,11	6,06	0,16	15,49	84,41
	1,12	5,64	0,26	15,80	79,59
- Espumante	1,15	5,84	0,09	18,31	92,96
	1,15	6,14	0,24	15,34	81,71
- pH neutro	1,16	6,02	0,17	16,76	86,87
	1,17	5,96	0,19	16,17	82,58
	1,18	6,13	0,15	16,78	87,10
	1,28	6,11	0,47	14,01	67,00
Média	1,13	5,95	0,24	15,28	80,22
Desvio	0,05	0,18	0,09	1,51	7,06

Fonte: Do autor (2022).