

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Programa de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Junia Maria Gândara Costa

ESTUDO DA AÇÃO DE ANTIESPUMANTES E SAIS INORGÂNICOS NO  
ABATIMENTO DE ESPUMA DE UM ESPESSADOR DE LAMAS

Belo Horizonte

2023

Junia Maria Gândara Costa

ESTUDO DA EFICIENCIA DE REAGENTES NA PERFORMANCE DE UM  
ESPESSADOR DE LAMAS EM UM PLANTA DE FILTRAGEM DE REJEITOS

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Rodrigues da Silva

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, a estudante Júnia Maria Gândara Costa, matrícula 2023662090, defendeu o Trabalho intitulado **"ESTUDO DA AÇÃO DE ANTIESPUMANTES E SAIS INORGÂNICOS NO ABATIMENTO DE ESPUMA DE UM ESPESSADOR DE LAMAS "**.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** 97

**Situação:** Aprovada

**Orientador:** Professor Gilberto Rodrigues da Silva

**Examinador:** Professor Luciano Fernandes Magalhães

**Examinadora:** Professora Geriane Macedo Rocha



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Rodrigues da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 15/01/2025, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Fernandes de Magalhães, Professor(a)**, em 16/01/2025, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geriane Macedo Rocha, Professora do Magistério Superior**, em 17/01/2025, às 20:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3811100** e o código CRC **EBA0D8C2**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder força e sabedoria ao longo dessa jornada. A minha família e ao Rian, por compreenderem e apoiarem as ausências nos fins de semana dedicados a este projeto. Ao professor Dr. Gilberto Silva, pela orientação valiosa e por toda paciência ao longo desse caminho.

Expresso minha gratidão à Vale, especialmente a Alexandre Camilo e Diego Costa, por acreditarem no meu potencial, financiando esta especialização e incentivando meu desenvolvimento profissional. Agradeço também ao CPT e à equipe do laboratório Cauê pela execução dos testes essenciais para este trabalho.

Registro ainda um agradecimento especial a Rogério José, Matheus Miranda e Marconi Silva, não apenas pelo suporte nos testes, mas também pela parceria profissional que muito agregou a esta experiência. Por fim, meu sincero obrigado a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

A todos, meu profundo reconhecimento e apreço.

## RESUMO

Um dos principais desafios no tratamento de rejeito, consiste no tratamento das lamas geradas no processo de beneficiamento, que, devido à granulometria ultrafina, apresentam reduzidas taxas de sedimentação e tendem a contaminar o overflow dos espessadores. Esse efeito é agravado pela presença de espumas. O presente trabalho buscou avaliar o impacto de reagentes antiespumantes e da composição iônica, bem como suas combinações na redução das espumas. Para isso foram realizadas análises químicas para caracterização do rejeito processados na Filtragem de rejeito, no qual identificou presença de contaminantes como talco, caulinita que podem ser observado pela presença de  $Al_2O_3$  e PPC nas análises químicas. Além disso foram realizados testes de bancadas com reagentes antiespumantes associados a sais inorgânicos, como  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$  e  $NaCl$ . Embora tanto os reagentes antiespumantes quanto os sais inorgânicos mostrem efeitos positivos na quebra de espumas quando adicionados individualmente, o mesmo não ocorre quando misturado o antiespumante ao sal inorgânico, dessa forma concluindo que sua combinação pode comprometer a ação antiespumante.

**Palavras chaves:** rejeitos; espessamento; espuma; partículas ultrafinas; antiespumante; íons.

## **ABSTRACT**

One of the main challenges in tailings treatment lies in managing the slimes generated during the beneficiation process. Due to their ultrafine particle size, these slimes exhibit low sedimentation rates and tend to contaminate the thickener overflow. This effect is exacerbated by the presence of foam. The present study aimed to evaluate the impact of antifoaming agents, ionic composition, and their combinations on foam reduction. For this purpose, chemical analyses were conducted to characterize the tailings processed during tailings filtration, identifying contaminants such as talc and kaolinite, as evidenced by the presence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and LOI (Loss on Ignition) in the chemical analyses. Additionally, bench tests were performed using antifoaming agents combined with inorganic salts such as  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ , and  $\text{NaCl}$ . Although both antifoaming agents and inorganic salts individually demonstrated positive effects on foam breaking, the same effect was not observed when combining antifoaming agents with inorganic salts, leading to the conclusion that their combination may compromise the antifoaming action.

**Palavras chaves:** tailings; thickening; foam; ultrafine particles; antifoam; ions.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. OBJETIVOS .....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
3.1. Geologia da Mina de Conceição .....	11
3.2. Fluxograma de Processo .....	12
3.2.1. Usinas Conceição I e II .....	12
3.2.2. Filtragem de Rejeitos .....	17
3.3. Espessamento .....	23
3.3.1. Espessamento de lamas .....	26
3.4. Floculação e Coagulação .....	27
3.5. Antiespumante .....	29
3.6. Efeito da força iônica na espumação .....	32
4. METODOLOGIA .....	33
4.1. Ensaio de Caracterização .....	35
4.1.1. Análise da mineralogia .....	36
4.1.2. Análise granulométrica e química por faixa .....	36
4.2. Testes de bancada: avaliação da espuma .....	37
4.2.1. Reagentes .....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42

5.1. TESTES 01: ensaios exploratórios com antiespumantes comerciais e sais inorgânicos .....	42
5.1.1. Estudos de caracterização .....	42
5.1.2. Testes de bancada: avaliação da espuma .....	44
5.2. TESTE 02: avaliação da dosagem dos sais .....	52
5.2.1. Estudos de Caracterização .....	53
5.2.2. Testes de bancada: avaliação da espuma .....	54
5.3. TESTE 03: influência do sal $\text{CaCl}_2$ na ação dos antiespumantes .....	56
5.3.1. Estudos de Caracterização .....	56
5.3.2. Teste de bancada: avaliação da espuma .....	58
6. CONCLUSÕES .....	63
7. TRABALHO FUTUROS .....	64
REFERÊNCIAS .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades de mineração no Brasil geram um grande volume de rejeitos. Em algumas usinas de beneficiamento de minério de ferro do quadrilátero ferrífero o volume de rejeito gerado corresponde a 50% do material alimentado das usinas. Tradicionalmente, os rejeitos provenientes do beneficiamento de minério são dispostos em barragens de rejeito. No entanto, esse sistema de contenção apresenta elevados riscos associados, registrando-se incidentes de grande impacto ambiental, social e econômico, inclusive os rompimentos das barragens ocorridos em 2015 e 2019. Diante disso, o desenvolvimento de novas formas de disposição se fez necessário, e a disposição de rejeitos filtrados a seco e empilhados surgiu como uma metodologia capaz de reduzir a dependência de barragens de alçamento (SERVI *et al.*, 2022).

Conforme abordado por Leite (2020), atualmente a liberação dos minerais de interesse é encontrada, geralmente, em partículas finas. Dessa forma, o circuito típico de beneficiamento de Itabirito, considerando a etapa a úmido, é composto basicamente por moagem, deslamagem, flotação e desaguamento, espessamento e filtragem. Os espessadores são aplicados no circuito visando a recuperação de água recirculada e adensamento da polpa sendo considerados uma das soluções mais econômicas. Eles são amplamente aplicados após hidrociclonagem, recebendo as lamas do processo. O adensamento ocorre por meio da adição de reagentes para floculação, coagulação e clarificação de água (ARJMAND *et al.* 2019).

As lamas provenientes do beneficiamento de minério são separadas na etapa de deslamagem e representam de 8-20% do minério alimentado na usina, além de conter partículas finas (99% < 45  $\mu\text{m}$ , 25% > 10  $\mu\text{m}$ , 45% < 5  $\mu\text{m}$  e 15% < 1  $\mu\text{m}$ ), o que dificulta a sedimentação de partículas suspensas e torna mais difícil alcançar a qualidade ideal da água no espessamento de rejeitos. Portanto, a floculação de rejeitos de minério de ferro é um passo crítico para a eficiência da separação sólido-líquido nas usinas de beneficiamento (MATIOLO *et al.*, 2020; LEITE, 2020).

O uso de reagentes como floculante e coagulante auxiliam na sedimentação da lama, e conseqüentemente na clarificação de água. Porém, os minerais contaminantes no *run of mine* influenciam na qualidade da água devido à espumação após os processos de tratamento de minério. Dessa forma a aplicação de antiespumantes pode ser uma alternativa para abatimento da espuma e conseqüente clarificação de água para reaproveitamento nos processos de beneficiamento.

O presente trabalho visa caracterizar a polpa quanto a mineralogia, buscando avaliar os possíveis minerais que contribuem para a estabilização das espumas persistentes que se formam no espessamento, bem como estudar os efeitos dos antiespumantes associados aos sais iônicos no abatimento de espuma em um espessador de lama aplicado em um circuito de filtragem de rejeito de minério de ferro em uma usina do quadrilátero ferrífero.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo do presente trabalho é estudar a eficiência de antiespumantes e o papel dos íons no abatimento de espuma de um espessador de lamas.

### **2.1. Objetivos específicos**

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Descrever a rota de processo para uma planta de filtragem de rejeitos utilizada na Usina de Conceição;
- Caracterizar as propriedades químicas, físicas e mineralógicas da amostra de rejeito;
- Analisar técnica e estatisticamente a eficiência de antiespumante utilizados no espessador de lamas;
- Avaliar efeito do antiespumante associado a íons no abatimento de espuma.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Geologia da Mina de Conceição

No Grupo Itabira, as formações ferríferas são encontradas na forma de itabiritos e hematitas compactas, altamente deformadas e composicionalmente modificadas pelos processos tectônicos e metamórficos. Pequenos núcleos preservados de magnetita no interior dos cristais de hematita sugerem que a maior parte dessas rochas era originalmente formações ferríferas fácies óxido, subfaces magnetita, posteriormente oxidadas por soluções hidrotermais durante os processos de deformação. Nos itabiritos do Proterozóico Inferior, além do quartzo, o mineral mais comum é a hematita (muitas vezes com núcleos alterados de magnetita) e, localmente, a dolomita pura. A dolomita ferrosa e a ankerita podem ocorrer na base da Formação Cauê, associadas a níveis de chert carbonático e filito dolomítico. Quanto aos óxidos de elementos maiores, os itabiritos de Proterozóico Inferior se distinguem principalmente pelos elevados teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (COSTA, 2013).

Na mina de Conceição, as formações ferríferas dolomíticas são tratadas como estéreis e são depositadas em pilhas permanentes, previamente definidas e não compõem a reserva lavrável de minérios ferríferos. As hematitas e itabiritos dolomíticos são descartados devido à incapacidade de processamento e comercialização deste litotipo, ocasionado principalmente pelos elevados teores de CaO e MgO, além de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e P (COSTA, 2013).

### 3.2. Fluxograma de Processo

A mina de Conceição localiza-se a aproximadamente 100 km de Belo Horizonte. As instalações da mina são apresentadas na Figura 1.



Figura 1: Localização da Filtragem de Rejeitos Conceição.

#### 3.2.1. Usinas Conceição I e II

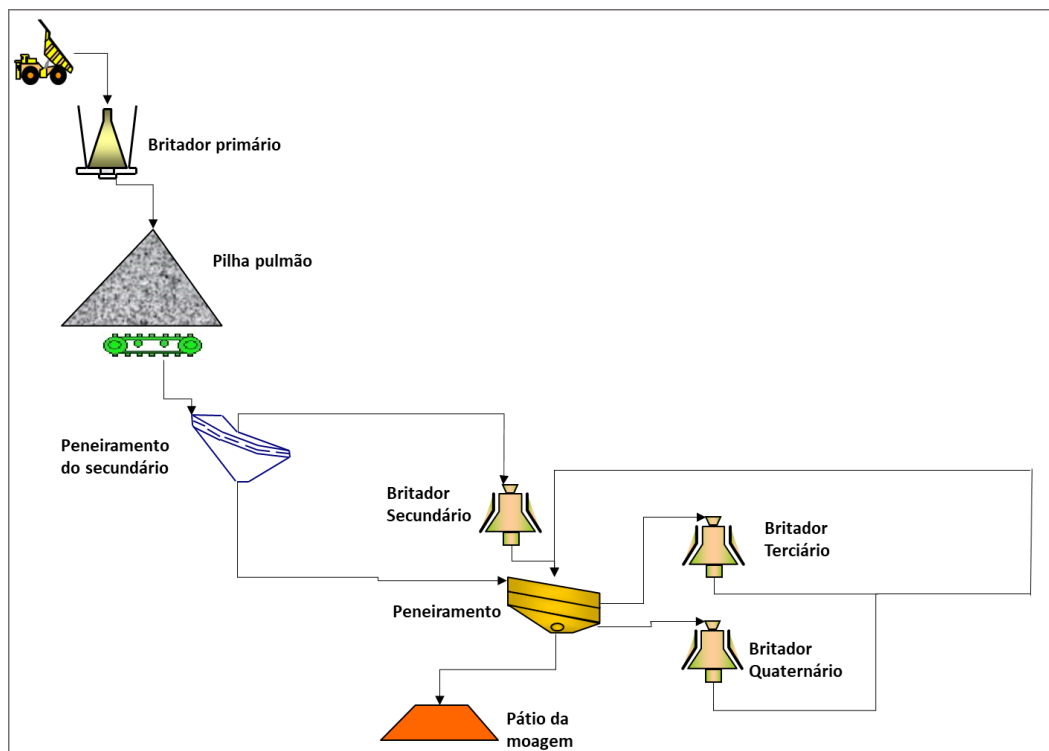
##### Processos à seco

O minério que alimenta a Usina de Conceição II é proveniente da mina de Conceição, sendo transportado por caminhões e descarregado no britador primário. O britador giratório primário (60" x 89", da Citic) reduz o minério em blocos de tamanhos de até 1 m para um topsize de 150 mm. O produto da britagem primaria é transportado mediante transportadores até a pilha reguladora, como mostrado na Figura 1.

A pilha pulmão tem um volume aproximado de 56.000 m<sup>3</sup>, o qual permite que as áreas da britagem secundária, britagem terciária e britagem quaternária continuem operando enquanto o britador primário entra em serviço. Os alimentadores vibratórios (1020 t/h de capacidade) localizados embaixo da pilha extraem o minério e o levam para o transportador de correia para transferi-lo à área de britagem secundária. Existem três “linhas” dentro da área de britagem secundária que operam independentemente uma da outra, cada linha possui uma peneira vibratória inclinada (10” x 24”) e um britador cônico padrão (modelo CS 440, Sandvik). O oversize da peneira (+63 mm) alimenta o britador enquanto o undersize (-63 mm) é transportado conjuntamente com o produto do britador secundário para o prédio de peneiramento.

Ainda no processo de cominuição, a britagem terciária tem quatro “linhas” e a britagem quaternária oito. Cada uma das linhas possui uma divisão do silo e um britador cônico padrão, sendo os terciários 212.6” C x 126” L x 209” A, da sandvik, e os quaternários 3780 mm C x 2984 mm L x 2510 mm A, da Metso. O produto do britador terciário (-50 mm) e quaternário (-25 mm) é transferido ao silo de alimentação da área de peneiramento em circuito fechado no peneiramento.

Área do peneiramento são compostas de 12 “linhas” de peneiras vibratórias inclinadas (dois decks, modelo MSH de 10” x 24”, da Metso). O oversize do deck superior (+38 mm) é enviado à britagem terciária e o oversize do deck inferior (+16 mm) é enviado à britagem quaternária, enquanto o undersize (-16 mm) é enviado à área do pátio da moagem. O fluxograma da britagem está ilustrado na Figura 2.



**Figura 2:** Fluxograma do circuito de britagem.

### Processos à úmido

O minério proveniente da britagem (área de pátio da moagem) é transferido por transportador de correias para os 3 silos da moagem. Da primeira divisão de cada um dos silos de armazenamento se extrai o minério mediante os alimentadores de correia os quais contam com as balanças integradoras para o controle da massa. Esses alimentadores enviam o minério aos 06 moinhos que operam no circuito em paralelo para alimentar as 03 linhas da usina de beneficiamento. Os moinhos são alimentados ainda por corpos moedores, bolas de aço, por meio de um sistema de alimentação de bolas modelo MAGOLOAD. O consumo de meios moedores é de 500 g/t.

A polpa proveniente da etapa de moagem será enviada à classificação através de bombas centrífugas. A classificação da moagem primária é constituída por três baterias com 10 hidrociclones de 26", onde se realiza a operação de classificação

(classificar o minério fino do grosso). O overflow da classificação da moagem é enviado às caixas de polpa para etapa subsequente, enquanto o underflow da classificação da moagem é enviado novamente à etapa de moagem.

A polpa proveniente da moagem é bombeada à deslamagem primária utilizando bombas centrífugas. A deslamagem primária é constituída por 06 baterias com 14 hidrociclones de 20", onde se tem a operação de separação da lama (o minério fino do grosso). O overflow da deslamagem primária é enviado por gravidade às caixas de polpa que alimentam a deslamagem secundária, enquanto o underflow da deslamagem primária é enviado por gravidade ao sistema de flotação (condicionador da flotação). A deslamagem secundária é constituída por 12 baterias com 16 hidrociclones de 10", no qual o overflow é enviado por gravidade à área de espessadores (espessador de lamas), enquanto o underflow é enviado para os condicionadores da flotação.

A polpa proveniente do sistema de deslamagem (underflow da deslamagem primária e o underflow da deslamagem secundária) ingressa aos condicionadores da flotação, no qual é adicionado com amido gelatinizado (atua como depressor, modificando as características superficiais das partículas dos óxidos de ferro para promover a sua depressão e garantir a sua recuperação no concentrado) e amina (atua como espumante e como coletor da ganga silicada, permitindo a formação de uma espuma estável, de tamanho de bolhas apropriado para levar a ganga à superfície). Hidróxido de sódio é utilizada como modificador de pH.

A polpa proveniente dos condicionadores é enviada as caixas de alimentação do circuito de flotação Rougher. O circuito de flotação Rougher é composto por 02 células mecânicas do tipo tank cell de 160 m<sup>3</sup> cada uma. Essas células estão alocadas em nível descendente para ajudar ao material fluir por gravidade e com um tempo de residência Rougher de 8 minutos. O ar é fornecido para cada célula Rougher fluindo através do eixo do agitador até a polpa num fluxo controlado. As partículas do minério que não formam parte do rejeito Rougher passam a uma caixa de concentrados a qual conta com duas válvulas dardo. As válvulas dardo regulam o fluxo e o nível nas células, trabalhando com um sensor de transmissão de nível ultrassônico.

O concentrado Rougher é enviado por gravidade à etapa de flotação Cleaner e o rejeito Rougher é enviado também por gravidade à etapa de flotação Scavenger I. O circuito de flotação Cleaner é composto com 02 células mecânicas do tipo tank cell de 100 m<sup>3</sup> cada, e também estão alocadas em nível descendente para ajudar ao material fluir por gravidade com um tempo de residência cleaner de 8 minutos. O concentrado Cleaner é enviado por gravidade à etapa de flotação Re-cleaner e o rejeito Cleaner é enviado por gravidade à etapa de flotação Scavenger I. O circuito de flotação Re-cleaner conta com uma célula mecânica do tipo tankcell de 100 m<sup>3</sup> e o tempo de residência Re-cleaner é de 8 minutos. O produto da Re-cleaner é concentrado final e o rejeito é enviado à Scavenger I.

O circuito de flotação Scavenger I é composto por 03 células mecânicas do tipo tank cell de 160 m<sup>3</sup> cada uma, com um tempo de residência de 20 minutos. O concentrado Scavenger I de cada linha é enviado por gravidade às caixas de polpa que alimentam a Rougher (início da flotação) e o rejeito Scavenger I é enviado na etapa de flotação

Scavenger II. O circuito de flotação Scavenger II é composto por 03 células mecânicas do tipo tank cell de 160 m<sup>3</sup> cada uma, com um tempo de residência de 20 minutos. O concentrado Scavenger II, juntamente com o Scavenger I, alimenta a Rougher e o rejeito é bombeado para a Barragem Itabiruçu, ou planta de Filtragem de Rejeitos, juntamente com o rejeito proveniente do espessador de lamas.

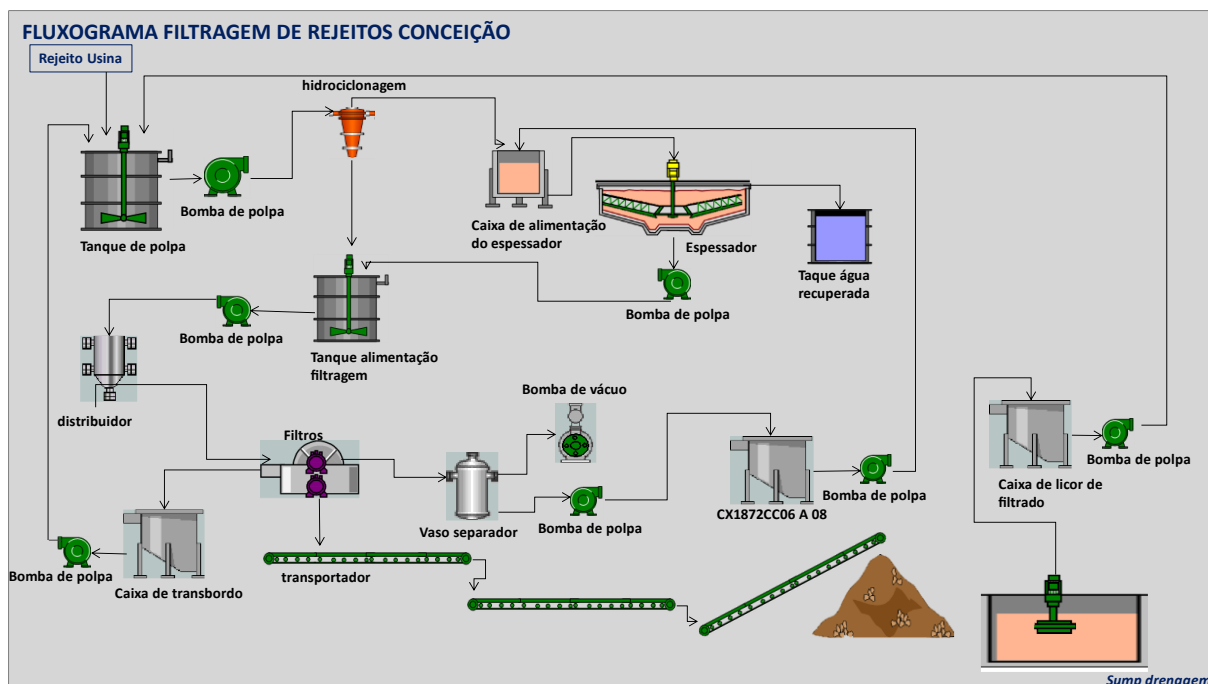
O concentrado da etapa de flotação Re-cleaner é enviado ao tanque de regularização do peneiramento de alta frequência, que após essa última etapa de concentração é direcionada para filtragem de produto e posteriormente para o pátio de produto.

### **3.2.2. Filtragem de Rejeitos**

O projeto Filtragem de Rejeitos Conceição foi um projeto desenvolvido para atender Conceição 1 e 2, ambos inseridos no contexto do Complexo Minerador de Itabira. As instalações da filtragem do rejeito proveniente da Usina de Conceição têm a capacidade de processar 26,1 Mtpa, base seca no qual:

- Taxa nominal rejeito total para a filtragem: 3.411 t/h base seca;
- Massa de rejeito filtrado anual: 26,1 Mtpa base seca;
- Massa de rejeito filtrado anual: 30,7 Mtpa à 15% umidade.

A Figura 3 contempla o fluxograma macro da planta de filtragem.



**Figura 3:** Fluxograma Macro da Filtragem de Rejeito.

As instalações de filtragem do rejeito proveniente da Usina de Conceição processam 26,1 Mtpa (milhões de toneladas por ano), base seca. A polpa previamente adensada é filtrada e a torta produzida disposta em pilha. Adicionalmente, o filtrado é reaproveitado como água de processo na usina, reduzindo o consumo de água nova. Além da dificuldade de licenciamento de barragens, existe também uma dificuldade adicional na obtenção de outorga para direito de uso de recurso hídrico.

O rejeito de Conceição proveniente do tratamento do minério é bombeado até a filtragem de rejeitos, de modo que 80% do rejeito composto pela fração arenosa e os demais 20% composta por lama. Esse rejeito pode ser direcionado para a Barragem do Itabiruçu, ou para a planta da filtragem.

Após alimentação de rejeito no tanque com agitador (TQ1872CC01) o rejeito é bombeado através das 9 bombas de polpa (5 operacionais e 4 reservas) para as

baterias de ciclones para separação granulométrica do rejeito. As baterias de ciclones são compostas de 32 ciclones WEIR modelo Cavex 32x250CVX6, no qual operam com pressões de 2,0-2,5 kgf/cm<sup>2</sup>. O overflow dos ciclones é transferido por gravidade para caixa do espessador, Tenova DELKOR, high density SR310-5 de 65 m de diâmetro, conforme Figura 4.



**Figura 4:** Espessador Tenova Delkor e prédio da Ciclonação.

Na etapa de espessamento é realizada a dosagem de reagentes, floculante e coagulante. O coagulante é estocado em um tanque com 76m<sup>3</sup> de capacidade e bombeado via bombas peristálticas para a caixa de alimentação do espessador. O floculante é preparado em um tanque contendo uma divisória de 3 septos com agitador para preparação mistura proveniente da rosca dosadora diluída em água (0,5% concentração). A transferência de floculante ocorre via transbordo para o tanque de estocagem. O produto é bombeado, e pode ser dosado na caixa de alimentação do

espessador, ou diretamente no *feedwhell* após uma segunda etapa de diluição (0,02% de concentração).

O underflow dos ciclones, com densidade aproximada de 2,10 t/m<sup>3</sup>, juntamente com o underflow do espessador, densidade 1,30 – 1,40 t/m<sup>3</sup>, serão direcionados para tanque com agitador para manter a polpa homogênea, densidade final 1,68-1,75 t/m<sup>3</sup>, que posteriormente é bombeada para os 3 prédios da filtragem (Figura 5).



**Figura 5:** Prédio da filtragem de rejeitos.

A alimentação da filtragem é realizada via distribuidor pressurizado (0,10 kgf/cm<sup>2</sup>), no qual cada prédio possui 2 distribuidores responsáveis pela alimentação de 4 filtros cada. Os filtros são a disco FLSMIDTH Ø8'-10" X 14 discos, com 140 m<sup>2</sup> de área para filtragem. Cada prédio possui 10 bombas de vácuo (GDNash - Anel Líquido 904T3), sendo 8 operacionais e 2 reservas, interligadas por um *header* para permitir maior flexibilidade para o sistema e manter vácuo entre 16-19 polHg. O licor de filtrado proveniente do processo de secagem é direcionado para um vaso separador e bombeado (Bombas Carver 4"X9" 855 OH) para uma caixa e posteriormente retorna para o espessador, uma vez que pode conter finos que transpassaram as telas de

tecido. Para melhor desempenho e produtividade da filtração, é possível realizar a dosagem de floculante (0,5% concentração) na bacia dos filtros. O prédio da filtração, com a disposição dos filtros e demais equipamentos periféricos, pode ser visto na Figura 6.



**Figura 6:** Prédio da filtração de rejeito composta de 8 filtros.

A torta gerada é transportada e empilhada pelo método Chevron em uma pilha do tipo feijão, para assegurar a homogeneidade, conforme Figura 7. O rejeito é recuperado com auxílio de caminhões para disposição nas pilhas PDERs (pilha de estéril e rejeito). A umidade final do rejeito deve ser menor que 12,3% para viabilizar o envio diretamente para PDERs, caso contrário, é direcionado para um pátio de secagem denominado PRU (pilha de regulação de umidade).



**Figura 7:** Pilha feijão sendo retomada para empilhamento.

Toda drenagem da planta e possíveis perdas de processo são direcionadas por gravidade para uma caixa de resíduo (Figura 8), que é bombeada para o primeiro tanque do processo.



**Figura 8:** Caixa de resíduos.

A caixa de resíduo contém 6 bombas verticais que retomam todo material destinado a caixa, evitando assim perdas para comunidade e demais áreas do *site*.

### 3.3. Espessamento

O processo de espessamento é o principal método de adensamento de lamas com alto teor de sólidos para a indústria mineral. O produto (*underflow*) do espessador viabiliza uma variedade de opções de disposição de rejeitos, desde redução da tensão de escoamento para bombeamento e disposição em barragens de rejeitos convencionais “hidráulico” até polpas mais concentradas para “disposição a seco” em aterro ou até mesmo como parte de processo para filtragem de rejeito e disposição em pilhas. O processo de espessamento, embora operado com sucesso em uma grande variedade de locais ao redor do mundo, é ainda empírico, sendo assim necessário maiores estudos para compreensão de comportamento visando melhorar o desempenho operacional (GLADMAN *et al.*, 2006).

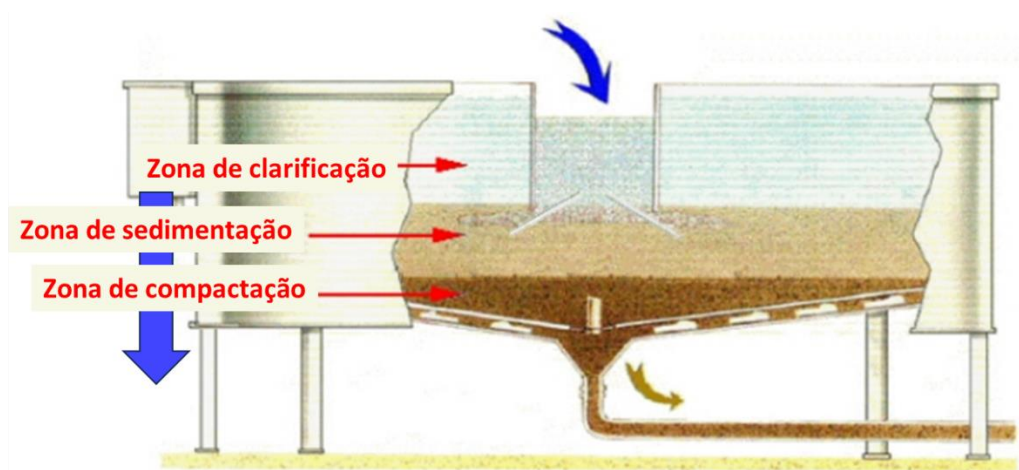
O espessamento visa atingir dois objetivos básicos e importantes para a separação sólido-líquido e o processo de mineração em geral, a produção de um sólido desaguado que atenda os processos subsequentes e a produção de um líquido clarificado, com características que permitam, preferencialmente, a sua recirculação direta ou que demande tratamentos simples e de baixo custo. A implantação de um equipamento para realização da separação das fases sólida e líquida depende das necessidades específicas do processo, bem como das características da alimentação. Historicamente, as melhorias no desempenho dos espessadores industriais têm sido baseadas na seleção de condições que produzem as propriedades desejadas no comportamento do teste de sedimentação, como a taxa de sedimentação livre, concentração final de sólidos no sedimento, viscosidade ou tensão de escoamento por cisalhamento. Essas variáveis dependem diretamente das características da polpa

como distribuição granulométrica e concentração de sólidos (FRANÇA e MASSARANI, 2018; GLADMAN *et al.*, 2006).

A polpa de rejeitos é geralmente alimentada através de um poço de alimentação central, *feedwell*, que dissipa a energia cinética enquanto melhora a mistura.

À medida que a polpa alimenta o espessador, os sólidos depositam-se no fundo. O licor clarificado transborda para o *over* e o fluxo de sólidos sedimentados é removido do fundo (*under*). Para melhorar o desempenho do espessamento, o floculante pode ser adicionado para agregar partículas finas formando flocos de tamanho maior (WANG *et al.*, 2021).

A Figura 9 mostra um corte transversal, ilustrando esquematicamente a operação de um espessador contínuo. A zona de clarificação é composta pelo licor transparente é essencialmente livre de sólidos na maioria das aplicações. A zona de sedimentação consiste em uma polpa de consistência bastante uniforme, que tem quase a mesma concentração de sólidos que a polpa alimentada. A zona de compactação mostra a polpa em compressão onde o desaguamento ocorre pela compressão dos sólidos, forçando os líquidos para fora das minúsculas aberturas nas partículas de sólidos.



**Figura 9:** Espessador (JEWELL, 2006).

O desempenho do espessador é significativamente afetado pelas propriedades reológicas dos rejeitos. A tensão de escoamento é um dos parâmetros reológicos de grande importância na suspensão dos minerais. A tensão de escoamento de misturas como mineral-água, polpa, depende das propriedades físicas da mistura (por exemplo, concentração de sólidos, distribuição de tamanho de partícula e forma) e do tipo e magnitude das forças interpartícula (por exemplo, pH e concentração iônica da polpa). A taxa de cisalhamento e a concentração de sólidos afetam significativamente a tensão de cisalhamento dos rejeitos espessados (DING *et al.*, 2007).

Em um estudo realizado por Aixiang Wu *et al.* (2015), discutiu-se o efeito da densidade de sólido, densidade aparente e concentração de sólidos na tensão de escoamento de rejeitos espessados. Nesse estudo, realizado com rejeitos de cobre, concluiu-se que a tensão de cisalhamento dos rejeitos espessados aumenta gradualmente com o aumento da concentração de sólidos. Este fenômeno é causado principalmente pela concentração relativamente alta de rejeitos espessados. Essa concentração resulta em uma grande força entre a partícula sólida e o líquido.

O pH é crucial no processo de desaguamento, sendo que as cargas superficiais de partículas coloidais, floculantes e coagulantes, especialmente em coagulantes/floculantes iônicos, variam de acordo com diferentes níveis de pH, que afetam consideravelmente o efeito de neutralização de carga. Conforme relatado nos trabalhos citados por Wei *et al.* (2018), as cargas negativas de partículas coloidais são geralmente aumentadas pelo aumento do valor do pH do sistema. Os coagulantes/floculantes geralmente exibem diferentes comportamentos com pH em

termos de desempenho de desaguamento, podendo influenciar a solubilidade, a velocidade da reação de hidrólise e as formas de precipitação.

A operação de desaguamento em um espessador envolve a atuação da gravidade na diferença de densidade entre as partículas sólidas e o líquido transportador (geralmente água), permitindo que as partículas sólidas se assentem. À medida que a concentração de sólidos da polpa aumenta, a taxa de sedimentação diminui progressivamente e acima de uma concentração crítica de sólidos conhecida como ponto de gel, a pasta exibe uma estrutura em rede e forma um leito na base do recipiente. Os testes de sedimentação são úteis na otimização do desempenho do espessador e nas propriedades do material de suspensão (GLADMAN *et al.*, 2006).

### **3.3.1. Espessamento de lamas**

A lama é frequentemente caracterizada como tendo uma ampla distribuição de tamanho de partícula e alta turbidez, o que pode causar problemas como lenta taxa de sedimentação de sólidos, alta turbidez do clarificado e baixa concentração de sólidos do underflow. O processo de espessamento também é influenciado pelas condições operacionais (por exemplo, taxa de fluxo de alimentação, concentração de sólidos de alimentação e regime de flocculante), que podem causar diferentes características de fluxo (por exemplo, padrão de fluxo, queda de pressão, intensidade de turbulência e taxa de sedimentação de partículas) (WANG *et al.*, 2021).

Investigar o comportamento dinâmico dos fluidos (lama) na escala de partículas e explorar o efeito das características do campo de fluxo causado pela flutuação da

operação de alimentação no desempenho do espessamento são, portanto, de grande importância para a compreensão e otimização do processo de espessamento (WANG *et al.*, 2021).

### **3.4. Floculação e Coagulação**

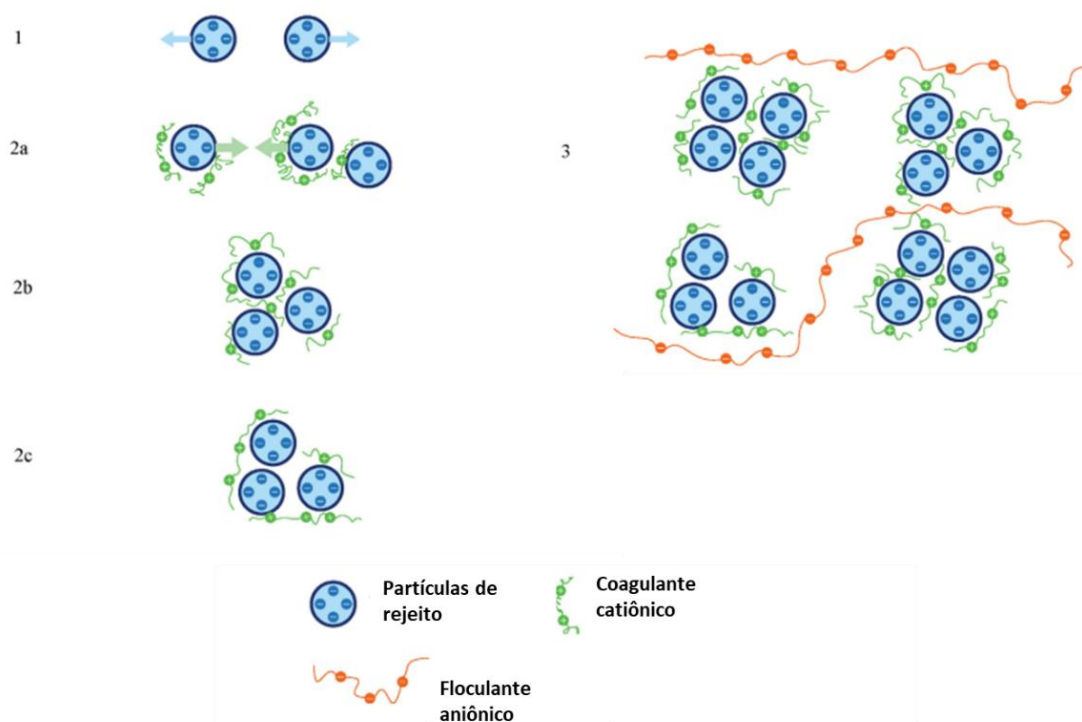
A floculação de rejeitos é um processo físico complexo. O floculante pode desestabilizar as partículas de rejeitos, fazendo com que cresçam gradualmente em agregados maiores (flocos). Além disso, devido à diferença de densidade entre as fases sólida e líquida, as partículas ou agregados de rejeitos assentam, enquanto a água livre sobe, o que também provoca a rápida separação do sistema líquido-sólido. De acordo com as composições químicas, o floculante pode ser dividido em floculante inorgânico, floculante de polímero orgânico e floculante microbiano. Diferentes floculantes exibem diferentes mecanismos de floculação, neutralização eletrostática, ponte de adsorção e aprisionamento (NAJAFABADI e SOARES, 2021). Floculação e sedimentação referem-se principalmente à adição de reagentes, floculantes, que induzem a adsorção eletrostática e o efeito de "ponte", fazendo com que as partículas finas dos rejeitos se aproximem, entrem em contato e se unam para formar uma longa cadeia polimérica e, em seguida, formar uma estrutura. Esse processo leva à formação de estruturas de flocos soltos ou densos que facilitam o movimento descendente acelerado. Vários fatores afetam o processo de sedimentação, incluindo tipo de floculante, peso molecular, consumo unitário, concentração de pasta, temperatura, pH, coagulante e número de contatos (WANG *et al.*, 2023).

A base da sedimentação por floculação é a sedimentação por gravidade. E o pré-requisito para a sedimentação por gravidade é uma diferença de densidade entre a fase dispersa e a fase contínua. De acordo com a lei de Stokes, a velocidade de sedimentação é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula, ou seja, o aumento no tamanho das partículas ocasionará a rápida sedimentação. A lama é composta por água e partículas de rejeitos com diferentes tamanhos e diferentes cargas. Partículas mais grossas com alta densidade tendem a sedimentar, enquanto partículas mais finas tendem a ficar suspensas de forma estável na água devido à interação entre as partículas. A interação é a razão essencial do seu comportamento de aglomeração ou dispersão. É bem conhecido que existem forças atrativas e repulsivas entre partículas carregadas (RUAN *et al.*, 2021).

Os coagulantes são eletrólitos que possuem cargas opostas às cargas das partículas e que causam a neutralização das cargas quando dispersos. Como resultado das forças moleculares, as partículas ao entrarem em contato uma com as outras se aderem. Os coagulantes mais utilizados são os sais inorgânicos (frequentemente carregados positivamente). A coagulação ocorre de forma mais pronunciada quando as partículas têm carga zero em relação ao meio, e isto acontece no ponto isoelétrico do sólido, quando o potencial zeta é zero (RESENDE, 2009).

A sedimentação é um processo no qual as partículas de rejeitos são desaguadas e compactadas por gravidade e agitação. WANG *et al.* (2023) realizaram ensaios para avaliar comportamento de reagentes (coagulante e floculante) no desempenho de um espessador. Na fase de coagulação, o efeito de agitação do *rake* eleva a colisão das partículas que estão desestabilizadas na água. Na fase de floculação, em que os

grandes flocos se desfazem facilmente, a compactação dos flocos foi melhorando quando a coagulação e a quebra atingem um equilíbrio dinâmico. Após a sedimentação, a concentração dos rejeitos aumentou gradativamente, e as partículas de rejeitos ficaram em contato umas com as outras. A água dos poros e a água envolvida dentro dos flocos subiram até o topo da camada de lama ao longo do canal de *overflow*. Além disso, o efeito de agitação do rake melhorou a eficiência de colisão das partículas desestabilizadas na água. O experimento de sedimentação foi capaz de alcançar o efeito de espessamento ideal nos rejeitos: alta concentração de sólidos e baixa turbidez da água de transbordo. O modelo físico da sedimentação abordada acima está detalhado na Figura 10.



**Figura 10:** Modelo físico do processo de coagulação de rejeitos: (1) repulsão eletrostática entre partículas; (2a) a atração entre partículas; (2b) os agregados de partículas formados pela atração; 2c) o efeito de ponte de adsorção do coagulante catiônico; (3) o efeito de ponte de adsorção de floculante aniônico. WANG *et al.* 2023, traduzido.

### 3.5. Antiespumante

Espumas e antiespumantes são duas entidades com naturezas completamente diferentes. Por exemplo, as espumas são estruturas de bolhas em contato, enquanto os antiespumantes são emulsões contendo partículas hidrofóbicas. A interação entre eles faz com que a espuma se decomponha mais rapidamente e ao mesmo tempo esgota o antiespumante. O mecanismo de tal efeito é complexo devido a muitos fenômenos que ocorrem na espuma. Por estas razões, são muito importantes do ponto de vista fundamental e prático.

Antes de abordar os antiespumantes, primeiro é necessário entender a formação das espumas. As espumas podem ser criadas pelo aumento repentino da área de contato entre o ar e a água. Durante a formação, a espuma pode colapsar ou ser convertido em fração volumétrica líquida decrescente. A taxa de coalescência das bolhas é uma propriedade complexa que depende da reologia da espuma e das forças de interação entre as bolhas de gás. Na maioria dos casos esses processos são controlados por um determinado surfactante, que está presente no sistema. A formação da espuma e a durabilidade da espuma podem ser controlados por meio da escolha adequada de surfactantes, concentrações e método de geração de espuma (Karakashev e Grozdanova, 2012).

Na mineração um processo importante para produção de concentrados a partir de minérios de ferro de baixo teor é o processo de flotação por espumas. A eficiência do processo depende fortemente do tamanho da bolha e da estabilidade da espuma, sendo necessária a utilização de espumantes. A dinâmica de flotação, para obtenção do concentrado, envolve a colisão e adesão entre bolhas e partículas minerais formando um agregado na polpa e o transporte desse agregado para a espuma. A

estabilidade da espuma, bem como o tamanho são fundamentais para que o processo de flotação atinja os resultados esperados de concentração do minério de interesse (MATOS *et al.*, 2022). Porém para os processos subsequentes a espuma pode se tornar um problema, por exemplo em bombeamento da polpa com espuma persistente, geração de excesso de transbordo de caixas, dentro outros (TURRER, 2018; FALCUCCI, 2014).

O controle da espuma é necessário em vários processos tecnológicos e produtos de consumo, não sendo uma particularidade da mineração. Na maioria dos casos, o controle de espuma mais eficiente é realizado adicionando uma pequena fração de aditivos químicos (normalmente, entre 0,01 e 0,5% em concentração) cuja principal função é prevenir ou reduzir a formação de espuma indesejada. Em alguns casos, é necessário um controle adicional realizado pela pulverização (aspersão) de substâncias sobre uma espuma já formada – nesse caso, esses aditivos são geralmente chamados de “antiespumantes” (DENKOV *et al.*, 2014).

Em uma revisão realizada por Denkov *et al.* (2014), foi retratado que o mecanismo de ação dos antiespumantes (surfactantes, proteínas ou polímeros solúveis) podem realizar um controle eficiente da espuma utilizando partículas sólidas hidrofóbicas apropriadas, como gotas de óleos ou compostos oleosos. De toda forma, os antiespumantes são dispersos como uma fase separada na solução espumante e, portanto, esses antiespumantes são chamados de antiespumantes “heterogêneos”. A experiência prática e a análise teórica retratadas mostram que a superfície das partículas dispersas (gotas) deve ser suficientemente hidrofóbica para uma ação

antiespumante eficaz. Portanto, esses antiespumantes são às vezes chamados de antiespumantes “hidrofóbicos”.

### **3.6. Efeito da força iônica na espumação**

Os sais inorgânicos estão amplamente presentes na água e têm um impacto significativo na aplicação de agentes espumantes. Estudos recentes provaram que o desempenho de formação de espuma dos surfactantes e a estabilidade dos sistemas de espuma correspondentes são fortemente afetados pelos sais inorgânicos devido ao grau de ionização dos sais metálicos e aos diferentes estados de valência dos seus ions (ZHANG et al., 2022).

Os fatores que afetam a estabilidade da espuma incluem qualidade da espuma, concentração de surfactante, pH, temperatura, impurezas, presença de polímeros, método de geração de espuma, tensão superficial e tipo de fluido base. A qualidade da espuma é o fator mais crítico na determinação da sua estabilidade. Os sais podem ser introduzidos nas espumas de várias maneiras, inclusive como aditivos para melhorar as propriedades da espuma ou por contaminação. A concentração e o tipo de sal na espuma têm efeitos diferentes na estabilidade e no comportamento de fluxo das espumas. Vários estudos investigaram o efeito dos íons de sais inorgânicos na adsorção do surfactante na interface gás-líquido utilizando a tensão superficial do líquido. A adsorção do surfactante iônico na interface gás-líquido influencia a coalescência das bolhas (OBISESAN et al., 2021).

Em um trabalho realizado por Behera et al. (2014), foi estudado a característica da formação e estabilidade da espuma na presença de surfactantes e sais. Foram

utilizados 3 tipos de soluções de surfactantes e adicionados os sais cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) e cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3$ ). Eles concluíram após testes que o  $\text{CaCl}_2$  foi significativamente mais eficaz na redução do volume da espuma em comparação com o NaCl. Porém, o NaCl foi mais eficaz na redução da tensão superficial das soluções. O volume de espuma, e o tamanho das bolhas diminuíram com o aumento da concentração de sal adicionado. O  $\text{AlCl}_3$  foi o mais efetivo para redução da espuma, seguido do  $\text{CaCl}_2$  e por último NaCl. Os autores associaram o aumento da concentração do sal à alteração da tensão superficial. A adição de sal teve um efeito significativo na interface ar-água, atuando na redução do potencial zeta.

Na ausência de NaCl, as bolhas permaneceram na superfície da solução por várias horas sem quebrar. À medida que a molaridade do NaCl aumentou em baixas concentrações, o tempo de repouso da solução diminuiu rapidamente, sendo isso atribuído à redução da força repulsiva eletrostática. À medida que a concentração de NaCl aumentou, as forças repulsivas eletrostáticas tornaram-se insignificantes. No entanto, esta pequena variação causou um efeito mais proeminente na redução da tensão superficial, o que aumentou o tempo de coalescência (ou seja, o tempo de repouso das bolhas). A adição de NaCl tem um efeito significativo na adsorção do surfactante na interface ar-água (KUMAR e GOSH, 2006).

Tanto os estudos realizados por Kumar e Gosh (2006) quanto por Behera *et al.* (2014) associam a adição de sal a alteração da tensão superficial, o que interferem na estabilidade da espuma, se tornando eficaz para o abatimento.

#### **4. METODOLOGIA**

Nesta fase discutir-se-á a estratégia experimental empregada no estudo, visando analisar o comportamento da lama após separação em ciclone no espessamento. O espessador a ser avaliado é parte do processo da filtração de rejeito. Dessa forma, foram utilizadas amostras de alimentação deste espessador da filtração de rejeito da planta da Filtração de Rejeitos de Conceição.

As amostras para análise foram coletadas diretamente no *overflow* do ciclone. Inicialmente foram coletadas 3 amostras, sendo uma para análise granulométrica e química, outra para análise mineralógica e uma terceira para os testes de bancada.

Os testes de bancada foram conduzidos próximo ao ponto de coleta de polpa no *overflow* do ciclone para evitar que o transporte da polpa influenciasse no comportamento da espumação, impactando nos resultados. Para cada um dos reagentes testados, os testes foram realizados em triplicata garantindo maior confiabilidade dos resultados.

As condições concebidas para a filtração de rejeito de Conceição foram desenvolvidas pelo projeto juntamente com o desenvolvimento mineral, e juntos estabeleceram que os parâmetros operacionais dos ciclones seriam de 2,4 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão. O modelo de ciclone adotado foi o WEIR CAVEX 250CVX6, que contém trinta e dois ramais em cada bateria, conforme ilustrado na Figura 11. Os ramais por sua vez, foram configurados com uma abertura de Apex de 49 mm e uma abertura de Vórtex de 70 mm.



**Figura 11:** Ciclone WEIR CAVEX 250CVX6 presente na planta de Filtragem de Rejeito.

#### **4.1. Ensaios de Caracterização**

Para caracterização da lama, quanto à composição química e à granulometria, foi coletada amostra no momento da realização de cada teste de bancada e direcionado ao laboratório. A análise mineralógica foi realizada apenas com a amostra de rejeito coletada durante o TESTE 01.

A metodologia empregada em cada ensaio de caracterização será descrita nos tópicos a seguir.

#### **4.1.1. Análise da mineralogia**

Antes do teste de bancada foram realizadas coletas de minérios que causam a espumação para caracterização mineralógica para avaliação dos minerais que compõe o minério responsável pela estabilidade da espuma. O teste de mineralogia foi realizado via DRX.

A identificação das fases cristalinas minerais por difração de raios X e a quantificação das fases cristalinas minerais foi feita através do método de Rietveld, o qual é um método matemático de mínimos quadrados que utiliza, essencialmente, parâmetros instrumentais e parâmetros da rede cristalina dos minerais identificados para ajustar o modelo experimental a um calculado e, assim, obter o percentual normalizado a 100 % das fases cristalinas identificadas. As condições de coleta de dados foram: Difratorômetro de raios X, Panalytical, modelo Empyrean com tubo de raios X com radiação  $\text{CoK}\alpha$  ( $\lambda = 1,78901 \text{ \AA}$ ), ângulo de varredura ( $2\theta$ ) de  $4^\circ$  a  $105^\circ$ , *step size* de  $0,026^\circ$  e tempo por passo 189 s.

#### **4.1.2. Análise granulométrica e química por faixa**

Durante a coleta de amostras para o teste de bancada, também foi coletada amostra de polpa para caracterização química e granulométrica em cada teste de bancada. A análise granulométrica consiste em uma técnica utilizada para determinar a distribuição granulométrica de um material, ou seja, a quantidade de partículas de diferentes tamanhos presentes em uma amostra. Esse parâmetro é de fundamental importância para a filtragem de rejeito, já que implica diretamente no empilhamento e compactação do produto gerado. A granulometria do rejeito influencia diretamente

nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais. O equipamento em questão utilizado para a realização desse teste é denominado Mastersizer 3000, que é um medidor de tamanho de partícula por difração laser, conforme Figura 12.



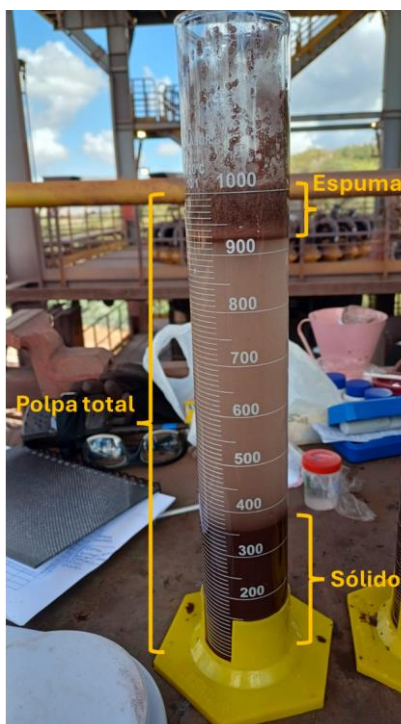
**Figura 12:** Equipamento Mastersizer 3000 utilizado para o teste granulométrico.

Para determinação da composição química das amostras coletadas, utilizou-se a fluorescência de raios X, que consiste em uma técnica chave para caracterizar a composição dos elementos de materiais. O equipamento da marca Rigaku realiza múltiplas medições de uma amostra para produzir um mapa de composição química dos elementos analisados.

#### **4.2. Testes de bancada: avaliação da espuma**

Os testes de bancada foram realizados próximo a área de coleta/formação da espuma para evitar a quebra de espuma por movimentação da polpa, que poderiam impactar nos resultados. A bancada foi instalada a menos de 5 m do ponto de coleta da polpa.

A polpa foi coletada em coletores de 1000 mL com haste, diretamente no ciclone. A polpa coletada foi testada em provetas de vidro, também de 1000 mL, na qual foram dosados os reagentes testados. A coleta de dados foi realizada por meio da leitura da régua graduada, conforme detalhado Figura 14. Os testes foram divididos em três etapas. Cada etapa será descrita a seguir.

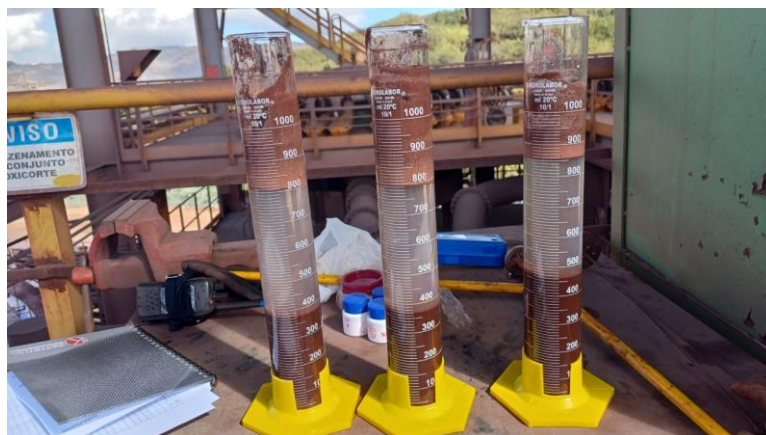


**Figura 13:** Leitura dos resultados durante os testes de bancada.

- **TESTE 01:** O objetivo foi avaliar o comportamento dos reagentes quanto ao abatimento de espuma. A dosagem específica de 40 g/m<sup>3</sup> na polpa.

As amostras foram coletadas no *overflow* do ciclone por meio de um coletor de amostra. As provetas foram preenchidas com o conteúdo do coletor, e as amostras foram pesadas. Após a coleta é contado o tempo de 180 segundos para estabilização da polpa e medição dos resultados, relacionados ao tamanho da camada de espuma, volume de polpa e sólido sedimentado. Os testes foram realizados inicialmente com a polpa “branca”, ou seja, sem reagente. Após análise dos resultados foi realizado a

dosagem de  $40 \text{ g/m}^3$ , ou aproximadamente  $0,4 \text{ mL}$ , em cada proveta do reagente a ser analisado (antiespumante ou sal). Por meio de um planger, foi realizado a agitação da polpa, no qual cada planger foi inserido por 10 vezes em cada proveta. Após 180 segundos foi realizada a coleta dos dados, conforme realizado no teste branco das provetas com reagentes (Figura 15).



**Figura 14:** Posicionamento das provetas, em triplicata, para avaliação dos resultados após 180 segundos.

Em casos que o volume de espuma ultrapassou a régua graduada de  $1000 \text{ mL}$ , foi utilizado uma régua para obter o resultado com precisão.

- **TESTE 02:** O objetivo foi avaliar a influência dos sais ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) sobre a espumação em diferentes dosagem, sendo elas  $20 \text{ g/m}^3$  e  $60 \text{ g/m}^3$ , e comparar com a performance com  $40 \text{ g/m}^3$  do teste 01. A execução do teste e coleta dos resultados seguiu o mesmo padrão descrito para o teste 01.
- **TESTE 03:** O sal com melhor performance e com a dosagem específica definida no TESTE 02, foi empregado juntamente aos 3 antiespumantes para análise da performance no abatimento de espuma. Assim como o TESTE 02,

a execução do TESTE 03 e coleta dos resultados seguiu o mesmo padrão descrito para o TESTE 01.

#### 4.2.1. Reagentes

Para realização dos testes de bancada foram utilizados 3 tipos de antiespumante, de 2 diferentes fornecedores. Foi utilizado também 3 tipos sais inorgânicos, visando avaliar como a dissociação dos íons pode estar contribuindo para espumação, como  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Cl^-$ . Todos os reagentes foram preparados na concentração de 10%, e em cada proveta foi realizada a dosagem específica de 40 g/m<sup>3</sup>. Os sais também foram avaliados com 20 g/m<sup>3</sup> e 60 g/m<sup>3</sup> visando identificar a melhor dosagem específica, para assim associá-los aos antiespumantes. Abaixo, segue a identificação de cada reagente:

- Clariant CADM – 24 074: Controlador de espuma a base de polímero de poli(oxietileno)-poli(oxipropileno);
- Solenis Advantage CS 6170: Agente Antiespumante. O Advantage CS 6170 é uma base de silicone de alto desempenho. O produto melhora o desempenho da evaporação por extração da espuma superficial. Deve ser aplicado em pH 6,0-10,0 (Boletim técnico Solenis);
- Solenis Logos 1092: O Logos 1092EV é uma base de silicone de alto desempenho. O produto melhora o desempenho da evaporação por extração da espuma superficial. superfície (Boletim técnico Solenis);

- Sais iônicos  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $NaCl$ . Os testes com os sais iônicos foram idealizados após uma análise da qualidade da água utilizada na preparação de reagentes antiespumantes. Na ocasião foi identificado que a água continha alguns sais que poderiam interferir na ação desses reagentes (Tabela 1). Dessa forma, foram selecionados os sais  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $NaCl$  para estudo de influência na espumação bem como a influência dos mesmos nos reagentes antiespumantes.

**Tabela 1:** Composição físico química da água de processo.

AMOSTRA	Amina (mg/L)	Amido (mg/L)	Tensão Superficial (mN/m)	Turbidez (NTU)	pH	Ca <sup>2+</sup> dissolvido (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> dissolvido (mg/L)	K dissolvido (mg/L)	Fe dissolvido (mg/L)	Al <sup>3+</sup> dissolvido (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> dissolvido (mg/L)
Água nova da Barragem Conceição	8,71	0,01	67,78	1,3	7,27	2,38	0,74	6,19	0,5	0,11	21,22

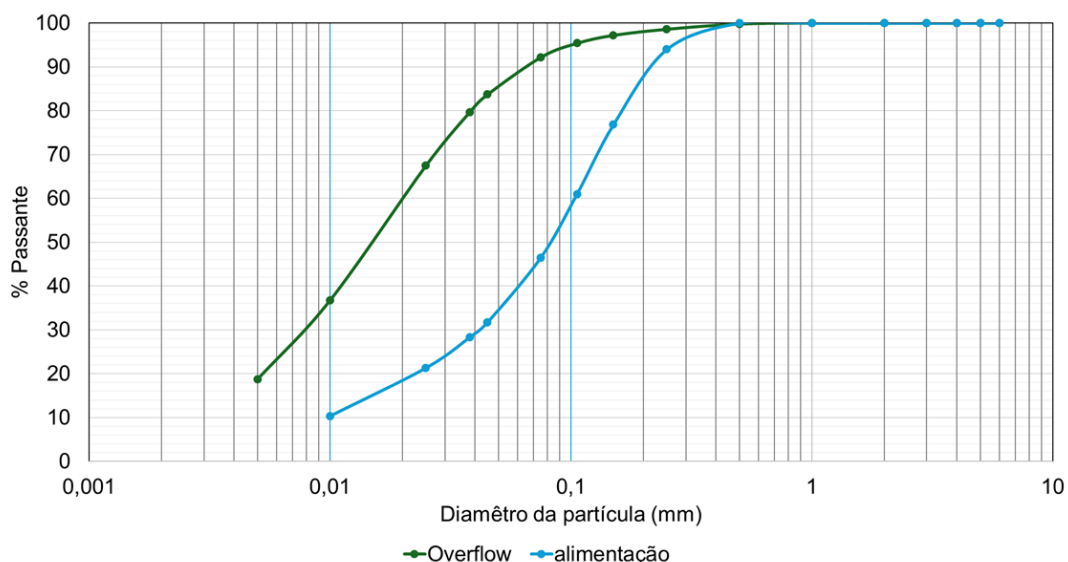
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. TESTES 01: ensaios exploratórios com antiespumantes comerciais e sais inorgânicos

Inicialmente foi realizado teste com dosagem de 40 g/m<sup>3</sup> para cada um dos reagentes testados, bem como para os sais. Os resultados da caracterização e dos ensaios de bancadas serão expostos a seguir.

#### 5.1.1. Estudos de caracterização

Por meio dos ensaios de análise granulométrica, temos que a granulometria do material proveniente das Usinas é composta pela fração arenosa, e pela lama caracterizada na faixa de 0,010 mm (vide Figura 16). Esse material que é então alimentado (curva azul) na ciclonagem, possui granulometria entre 10 e 15% de passante 0,010 mm. Após a partição no ciclone, a fração lama (*overflow*) alimenta o espessador (curva verde).



**Figura 15:** Distribuição granulométrica da alimentação e overflow da ciclonagem.

A alimentação do espessador é composta basicamente de lama, no qual a fração 0,010 mm apresenta quase 40% do sólido contido na polpa. Com isso, pode-se inferir, como já era esperado, que a fração arenosa é encaminhada para o *underflow* do ciclone e a fração fina (lama) para *overflow* do ciclone e posteriormente alimenta o espessador.

Na Tabela 2 de alimentação do ciclone observamos presença de 0,69% de  $Al_2O_3$  (alumina), 17% de Fe (ferro) e aproximadamente 74% de  $SiO_2$  (silica).

**Tabela 2:** Composição química da alimentação do ciclone, por faixa.

Nome	Faixa	Fe	$SiO_2$	P	$Al_2O_3$	Mn	$TiO_2$	CaO	MgO	PPC
Alimentação do ciclone	GLOBAL	17,67	73,85	0,008	0,69	0,058	0,038	0,036	0,125	0,100
Alimentação do ciclone	+0,045mm	12,41	81,73	0,005	0,34	0,019	0,035	0,020	0,100	0,010
Alimentação do ciclone	-0,045mm	36,17	45,60	0,030	1,40	0,133	0,043	0,087	0,156	0,760
Alimentação do ciclone	+0,075mm	7,04	89,54	0,004	0,14	0,014	0,033	0,011	0,029	0,030
Alimentação do ciclone	+0,106mm	5,51	92,29	0,003	0,16	0,015	0,032	0,014	0,045	0,060
Alimentação do ciclone	+0,15mm	4,42	93,53	0,004	0,21	0,017	0,032	0,019	0,059	0,060

A  $Al_2O_3$  é encontrada basicamente em frações menores, abaixo de 0,045 mm, assim como grande parte do Fe. Em contrapartida, a  $SiO_2$  é concentrada nas frações arenosas (de maior granulometria). Na Tabela 3, tem-se um foco nas composições por faixa granulométricas do overflow do ciclone, ou seja, alimentação do espessador.

**Tabela 3:** Química por faixa overflow ciclone.

Nome	Faixa	Fe	$SiO_2$	P	$Al_2O_3$	Mn	$TiO_2$	CaO	MgO	PPC
Overflow do ciclone	GLOBAL	29,00	54,79	0,048	2,40	0,229	0,037	0,078	0,214	1,330
Overflow do ciclone	+0,045mm	5,33	92,71	0,003	0,37	0,020	0,033	0,011	0,174	0,030
Overflow do ciclone	-0,045mm	31,21	51,47	0,052	2,62	0,239	0,041	0,092	0,220	1,370
Overflow do ciclone	+0,075mm	6,61	90,15	0,005	0,36	0,029	0,034	0,017	0,078	0,110

Observa-se que a amostra global da lama é composta por teores mais elevados de Fe (29%) e  $SiO_2$  (55%). A fração mais grossa da lama +0,075 mm é composta basicamente por  $SiO_2$ . Por outro lado, a fração mais fina da lama (-0,045 mm)

concentra grande parte da  $Al_2O_3$  da amostra e Fe. Um ponto de atenção é o PPC (perda por calcinação) mais alto, 1,33%, que pode estar relacionado à presença de minerais hidratados (goethita e caulinita). Em relação aos contaminantes ( $Al_2O_3$ , Mn e P), observa-se que apesar de não serem significativamente altos, apresentam-se em maior proporção na fração menor, -0,045 mm, podendo indicar presença de argilominerais (ROCHA *et al.*, 2019).

Essa polpa foi caracterizada por difratometria e raios X para avaliação dos minerais que compõe o rejeito.

**Tabela 4:** Composição mineralógicas do rejeito investigado no TESTE 01.

Quantificação Mineralógica (%)						
Hematita	Goethita	Quartzo	Caulinita	Talco	Clorita	Biotita
47,40	1,19	46,20	2,50	0,65	1,18	0,85

Conforme a Tabela 4, o minério avaliado é composto por quartzo e hematita, porém com presença de caulinita, goethita, clorita, talco e biotita, o que explica os resultados elevados de PPC na análise química.

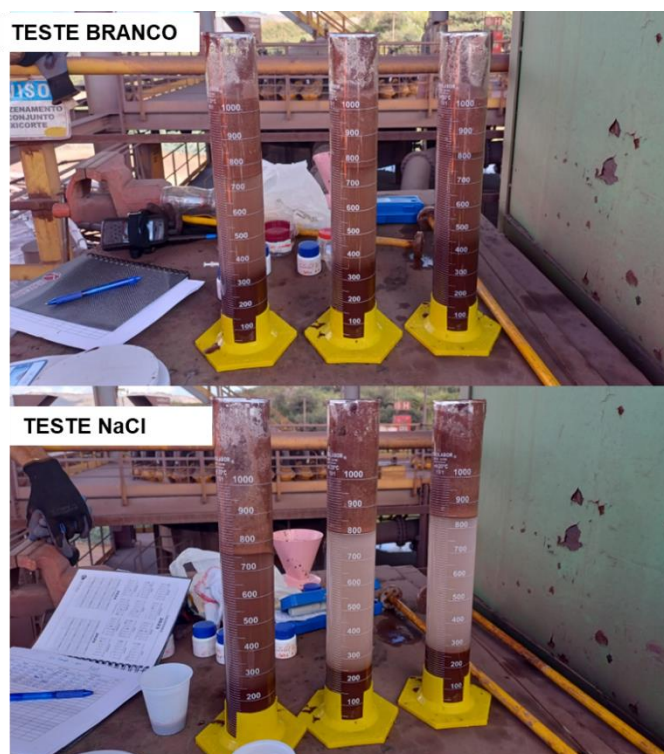
### 5.1.2. Testes de bancada: avaliação da espuma

Os testes de avaliação da espuma foram realizados coletando amostras no *overflow* da bateria de ciclone 05 (CI1872CC05). O equipamento estava com 2,4 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e vazão de alimentação de aproximadamente 1200 m<sup>3</sup>/h. A primeira coleta foi realizada para medição do pH, se encontrava em 8,5. A filtragem de rejeito era alimentada com rejeito total (arenoso + lama) proveniente da Usina de Conceição II. O primeiro teste foi realizado com o reagente NaCl, no qual obteve-se os resultados apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Parâmetros da polpa de rejeito no ensaio com NaCl.

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			Densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	853	1050	300	250	910	140	240	160	-53%	1,11	15%
2	878	1040	260	260	930	130	240	130	-50%	1,10	13%
3	934	1000	170	310	950	110	260	60	-35%	1,11	15%

Os resultados para o NaCl preparados com 10% de concentração após 10 agitações com o planger, mostraram uma redução de até 53% no volume da espuma. Porém o aspecto da espuma permaneceu estável, e não houve alterações significativas no pH após a dosagem do reagente que foi de 8,2. A densidade média foi de 1,11 t/m<sup>3</sup>, e não foi observada um aumento significativo na camada de sólido aparente, conforme observado na Figura 17.

**Figura 16:** Testes em branco e com NaCl.

Na Tabela 6 tem-se os resultados dos testes com o reagente CADM Clariant.

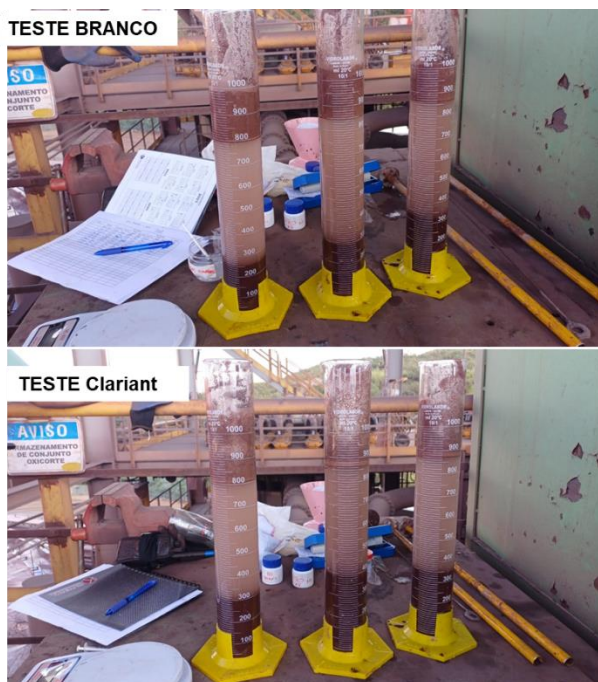
**Tabela 6:** Parâmetros da polpa de rejeito no ensaio com CADM Clariant.

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	877	980	180	280	940	140	260	40	-22%	1,10	13%
2	935	1040	190	330	960	100	320	90	-47%	1,09	12%
3	944	1010	150	370	950	120	300	30	-20%	1,14	18%

Os resultados com o reagente CADM Clariant mostraram uma redução no volume de espuma menor, variando de 20 a 47%, se comparado com os demais testes realizados, porém o aspecto da espuma após a dosagem ficou mais instável, e com coloração diferenciada, *vide* Figura 18. O sólido aparente não sofreu alteração significativa no volume.

**Figura 17:** Aspecto da espuma após dosagem do antiespumante CADM – Clariant.

A espuma com aspecto instável é viável uma vez que possibilita sua quebra no espessador com a utilização dos sprays internos e de borda. Na Figura 19, verifica-se o aspecto da espuma gerada bem como da interface entre sedimentado, clarificado e espuma.



**Figura 18:** Testes em branco e com antiespumante Clariant CADM.

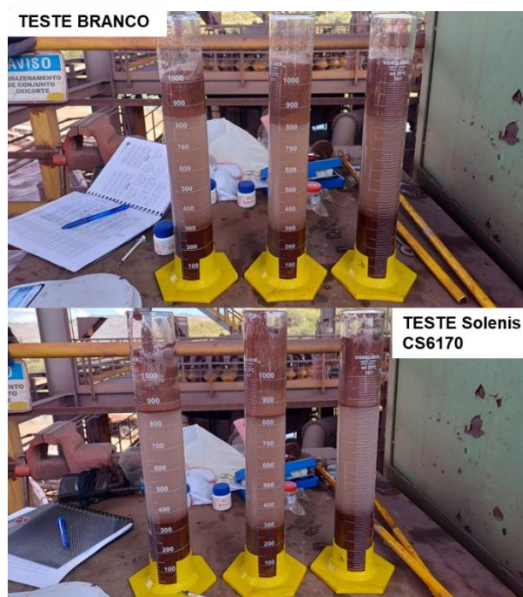
Observando a Figura 19, conclui-se que o reagente Clariant CADM não teve ação significativa na turbidez do clarificado.

Na Tabela 7 tem-se os resultados para o reagente CS6170.

**Tabela 7:** Parâmetros da polpa de rejeito no ensaio com Solenis CS6170.

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			Densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	915	1000	150	330	950	80	310	70	-47%	1,05	7%
2	929	1070	230	330	970	130	250	100	-43%	1,11	14%
3	948	1070	220	410	960	90	290	130	-59%	1,09	12%

O teste com o reagente Solenis CS6170 apresentou redução do volume da espuma de até 59%, porém outros 2 bem próximos de 45%. Nas provetas 02 e 03 observou-se um aumento no sólido aparente, provavelmente proveniente da espuma que foi quebrada pela adição do reagente. Não se observou instabilidade na espuma que permaneceu formada na proveta, mas o reagente se mostrou eficiente na redução do volume da espuma.



**Figura 19:** Testes em branco e com o antiespumante Solenis CS6170.

Observando a Figura 20, conclui-se que o reagente não teve efeito significativo sobre a turbidez do clarificado. Conforme retratado na metodologia, foram utilizados 2 reagentes do fornecedor Solenis. O segundo reagente, Logos 1092, será descrito abaixo, na Tabela 8.

**Tabela 8:** Parâmetros da polpa de rejeito no ensaio com Logos 1092.

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			Densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	950	1050	190	320	960	80	320	110	-58%	1,08	11%
2	972	1040	140	310	980	80	150	60	-43%	1,08	11%
3	939	1030	160	340	940	70	280	90	-56%	1,08	11%

O reagente Solenis Logos 1092 apresentou uma redução de espuma variando de 43 a 58%, conforme pode ser avaliado na Figura 21. A camada de sólido aparente se manteve próximo do resultado branco, mostrando uma maior compactação da polpa. As densidades de polpa coletada em todos os testes se mantiveram próximos.



**Figura 20:** Testes em branco e com antiespumante Solenis Logos 1092.

O teste com o reagente Logos 1092, diferentemente do CS6170, se mostrou mais eficiente na redução da turbidez do clarificado. Apesar de não ser o foco do trabalho, a ação de um antiespumante sobre a turbidez do clarificado se mostra importante para substituir a utilização de um coagulante.

O penúltimo teste preliminar foi conduzido com o  $MgCl_2$ . Os resultados obtidos estão na Tabela 9 e na Figura 22.

**Tabela 9:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com  $MgCl_2$ .

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]		
1	990	1050	130	300	1020	70	290	60	-46%	1,04	6%
2	1003	1030	100	320	1000	50	310	50	-50%	1,06	8%
3	1012	1030	80	360	1000	40	290	40	-50%	1,05	8%

Os resultados com  $MgCl_2$  se mostraram positivos, com média próximo de 50% de redução da espuma, conforme Figura 22. A camada de sólido aparente reduziu na faixa de 40 mL, mostrando uma maior compactação do sólido após a dosagem do sal. Na Figura 22 tem-se os aspectos visuais da polpa após dosagem do sal.

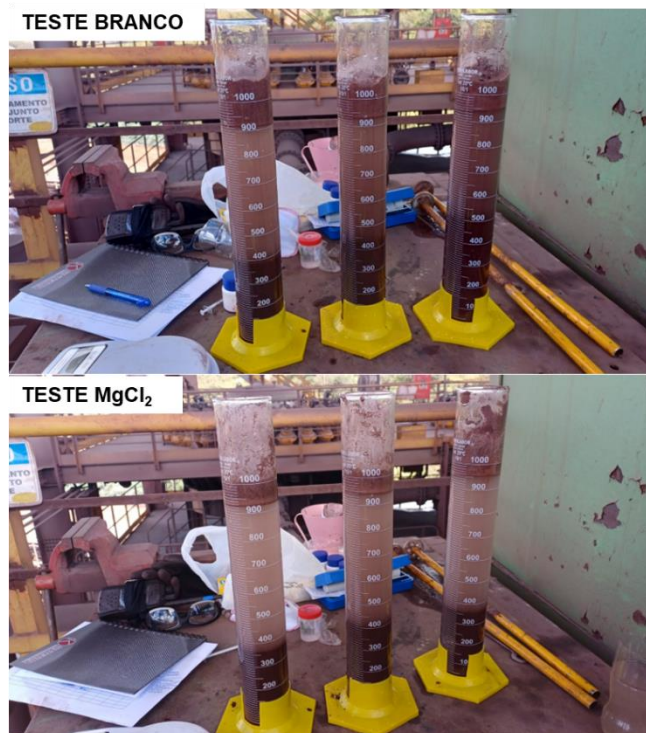


Figura 21: Testes em branco e com  $MgCl_2$ .

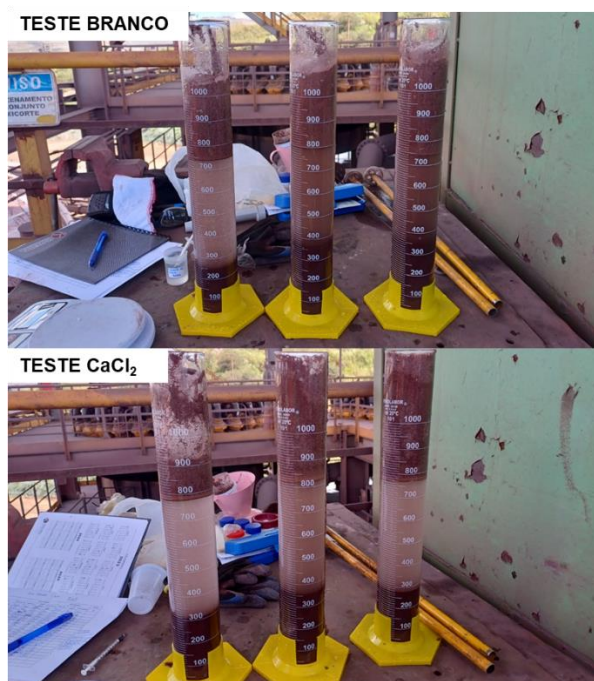
Após dosagem do  $MgCl_2$ , o clarificado não apresentou variação no que diz respeito a turbidez, porém é visível a redução de espuma promovida pela presença do sal. O último teste foi também com um sal, porém com o  $CaCl_2$  conforme descrito os resultados na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros da polpa e espuma obtidos com  $CaCl_2$ .

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	858	1030	280	210	920	140	260	140	-50%	1,10	14%
2	910	1070	270	280	930	110	280	160	-59%	1,11	15%
3	862	1080	330	260	870	100	240	230	-70%	1,12	16%

O  $CaCl_2$  foi o sal que se mostrou mais efetivo no que diz respeito a redução de espuma, promovendo uma redução acima de 50%, chegando a reduzir 70% na proveta 03. Esse resultado se mostra promissor, uma vez que a redução de 70% de espumação poderia minimizar significativamente os efeitos da espumação no

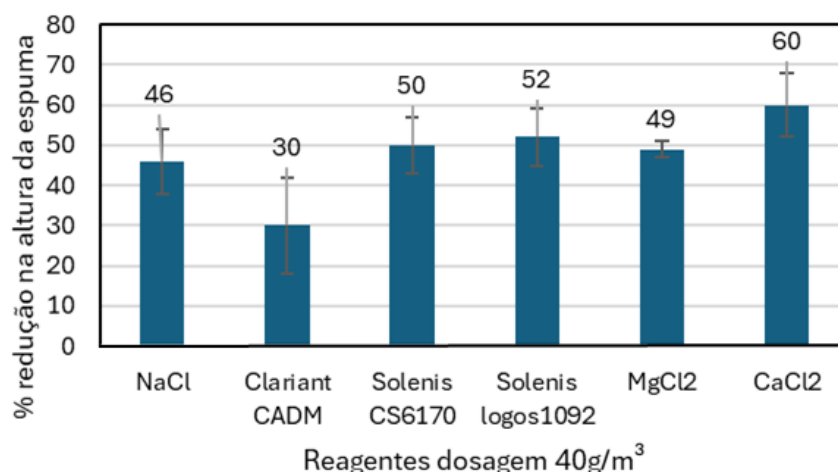
espessador, no qual o restante poderia ser quebrado pelos sprays. Em relação ao sólido aparente, o mesmo se manteve estável, mesmo com a redução significativa da espuma, que foi de até 230 mL.



**Figura 22:** Testes em branco e com  $\text{CaCl}_2$ .

O  $\text{CaCl}_2$  também se mostrou efetivo também na clarificação da polpa, conforme a Figura 23, sendo possível observar esse efeito visualmente.

Conforme a Figura 24, os resultados apresentados por Solenis tanto para os reagentes CS6170 quanto logos1092 foram próximos e com baixa variação nos resultados. Os resultados do CADM – Clariant apresentaram grande variação (20-45%) no abatimento de espuma.



**Figura 23:** Redução média do volume da espuma com a ação de antiespumantes e sais.

Dentre os reagentes antiespumantes, o Solenis CS6170 e o Logos 1092 apresentaram melhor desempenho no abatimento de espuma considerando a dosagem de 40 g/m<sup>3</sup>. Já entre os sais, o CaCl<sub>2</sub> apresentou um efeito superior aos demais, juntamente com MgCl<sub>2</sub>. Esse resultado corrobora com o obtidos por Behera *et al.* (2014). Em seus testes, os autores concluíram que o CaCl<sub>2</sub> foi muito mais eficaz na redução do volume da espuma em comparação com o NaCl. Porém, o NaCl foi mais eficaz na redução da tensão superficial das soluções. O volume de espuma, e o tamanho das bolhas diminuíram com o aumento da concentração de sal adicionado.

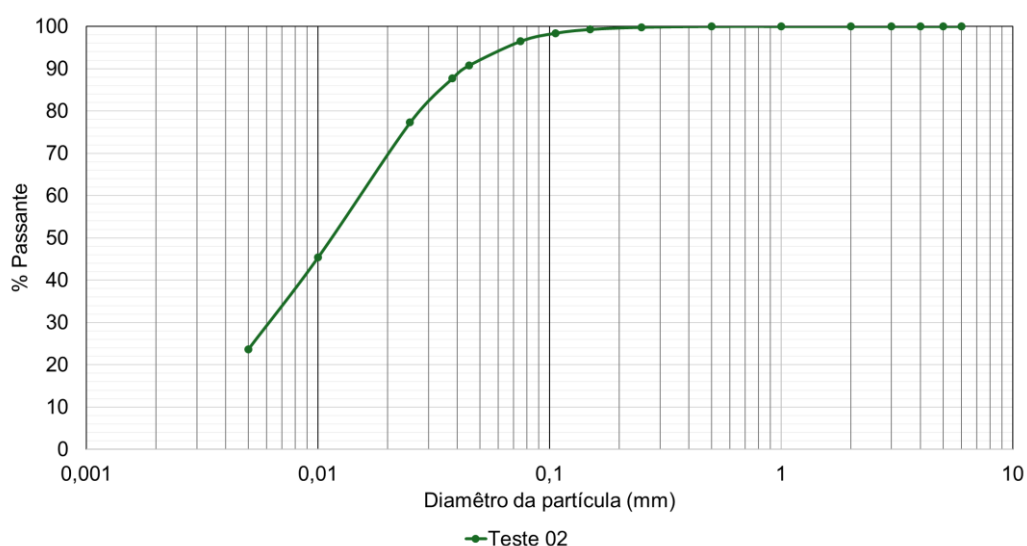
## 5.2. TESTE 02: avaliação da dosagem dos sais

Na segunda etapa dos ensaios, foram realizados testes com dosagem de 20 g/m<sup>3</sup> e 60 g/m<sup>3</sup> para cada bem como para os sais. Os resultados dos ensaios de caracterização do rejeito e de bancadas serão expostos a seguir.

### 5.2.1. Estudos de Caracterização

Como os testes foram realizados em condições diferentes do TESTE 01, ou seja, com coleta de polpa em outro dia, foi necessário realizar análise de caracterização para avaliação da química e granulometria.

Iniciando as análises em relação a granulometria, observou-se que a alimentação do espessador é composta basicamente por lama, no qual a fração 0,010 mm representa quase 40% da polpa (Figura 25).



**Figura 24:** Distribuição granulométrica da polpa coleta para TESTE 02.

Na Tabela 11, tem-se que o comparativo granulométrico dos TESTE 01 e do TESTE 02.

**Tabela 11:** Comparativo granulométrico entre amostra dos TESTE 01 e 02.

Nome	Faixa [mm]	2	1	0,5	0,25	0,15	0,106	0,075	0,045	0,038	0,025	0,010	0,005	-0,005
TESTE 02: amostra overflow	GLOBAL	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,9	1,9	5,7	3,1	10,4	31,9	21,7	23,7
TESTE 01: amostra overflow	GLOBAL	0,0	0,0	0,2	1,2	1,4	1,8	3,2	8,5	4,0	12,2	30,7	18,0	18,8

O TESTE 01 apresentou algumas frações grosseiras (0,5 mm) e maior fração de 0,25 mm. Porém quando comparado na fração mais finas, as amostras podem-se inferir que as amostras não apresentam diferenças significativas.

**Tabela 12:** Composição química para a faixa de 0,045mm do overflow ciclone no TESTE 02.

Nome	Faixa	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
Overflow ciclone	GLOBAL	38,07	38,88	0,061	2,78	0,282	0,084	0,138	0,378	2,240
Overflow ciclone	-0,045mm	38,31	38,60	0,060	2,73	0,268	0,083	0,135	0,338	1,880

Pela Tabela 12, observa-se que a análise global da lama apresenta um maior conteúdo de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 2,78%, ante 2,40% da amostra do TESTE 01 (Tabela 02). Um ponto de atenção é em relação ao PPC, que se encontra em 2,24% no TESTE 02, ou seja 68% maior que a amostra do TESTE 01. Esse elevado PPC mostra uma perda por calcinação relativamente alta, ou seja, tendência da presença de caulinita, principalmente quando associado aos teores elevados de alumina.

### 5.2.2. Testes de bancada: avaliação da espuma

Da mesma forma que o TESTE 01, os testes com os sais em diferente dosagem (TESTE 02) foram conduzidos coletando amostras no *overflow* da bateria de ciclone 05 (CI1872CC05). O equipamento apresentava com 2,4 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e vazão de alimentação de aproximadamente 1200 m<sup>3</sup>/h. A filtragem de rejeito era alimentada com rejeito total (arenoso + lama) proveniente da Usina de Conceição II.

Os resultados obtidos para a dosagem de 20 e 60 g/m<sup>3</sup> estão expostos na Tabela 13.

Com 20 g/m<sup>3</sup> o NaCl apresentou maior abatimento de espuma.

**Tabela 13:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com NaCl 20 g/m<sup>3</sup> e 60 g/m<sup>3</sup>.

	massa proveta	TESTE BRANCO			TESTE 20 g/m <sup>3</sup>					TESTE 60 g/m <sup>3</sup>				
		polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente	Redução para teste branco		polpa total	camada espuma	sólido aparente	Redução para teste branco	
		[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	[%]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]
1	852	1000	350	400	950	300	450	-50	-14%	950	300	460	-50	-14%
2	1280	1020	310	400	1000	280	490	-30	-10%	1010	280	480	-30	-10%
3	1305	1050	310	430	1010	260	560	-50	-16%	1050	290	550	-20	-6%

Os resultados obtidos para a dosagem de 20 e 60 g/m<sup>3</sup> de MgCl<sub>2</sub> estão expostos na Tabela 14. Para o MgCl<sub>2</sub> o melhor resultado de abatimento foi com 60 g/m<sup>3</sup>.

**Tabela 14:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com MgCl<sub>2</sub> 20 g/m<sup>3</sup> e 60 g/m<sup>3</sup>.

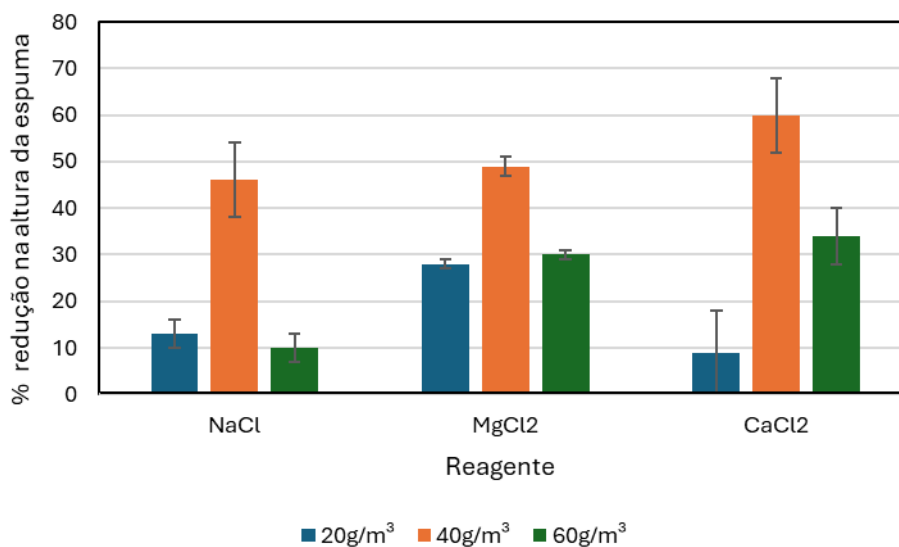
	massa proveta	TESTE BRANCO			TESTE 20 g/m <sup>3</sup>					TESTE 60 g/m <sup>3</sup>				
		polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente	Redução para teste branco		polpa total	camada espuma	sólido aparente	Redução para teste branco	
		[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	[%]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]
1	737	1000	400	290	890	290	410	-110	-28%	900	280	390	-120	-30%
2	785	1000	340	300	900	240	490	-100	-29%	920	240	450	-100	-29%
3	705	1000	420	290	880	310	460	-110	-26%	890	290	420	-130	-31%

Na Tabela 15 tem os resultados para o último sal, CaCl<sub>2</sub>.

**Tabela 15:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com CaCl<sub>2</sub> 20 g/m<sup>3</sup> e 60 g/m<sup>3</sup>.

	massa proveta	TESTE BRANCO			TESTE 20 g/m <sup>3</sup>					TESTE 60 g/m <sup>3</sup>				
		polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente	Redução para teste branco		polpa total	camada espuma	sólido aparente	Redução para teste branco	
		[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	[%]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]
1	853	1020	290	350	1000	250	370	-40	-14%	940	190	440	-100	-34%
2	779	1000	360	330	950	300	350	-60	-17%	870	210	420	-150	-42%
3	870	1030	300	370	1060	310	420	10	3%	980	220	500	-80	-27%

Para o CaCl<sub>2</sub> o melhor resultado de abatimento, também foi com 60 g/m<sup>3</sup>. Comparando os resultados do TESTE 02 (20 e 60 g/m<sup>3</sup>) com o TESTE 01 (40 g/m<sup>3</sup>), temos os resultados expostos na Figura 26.



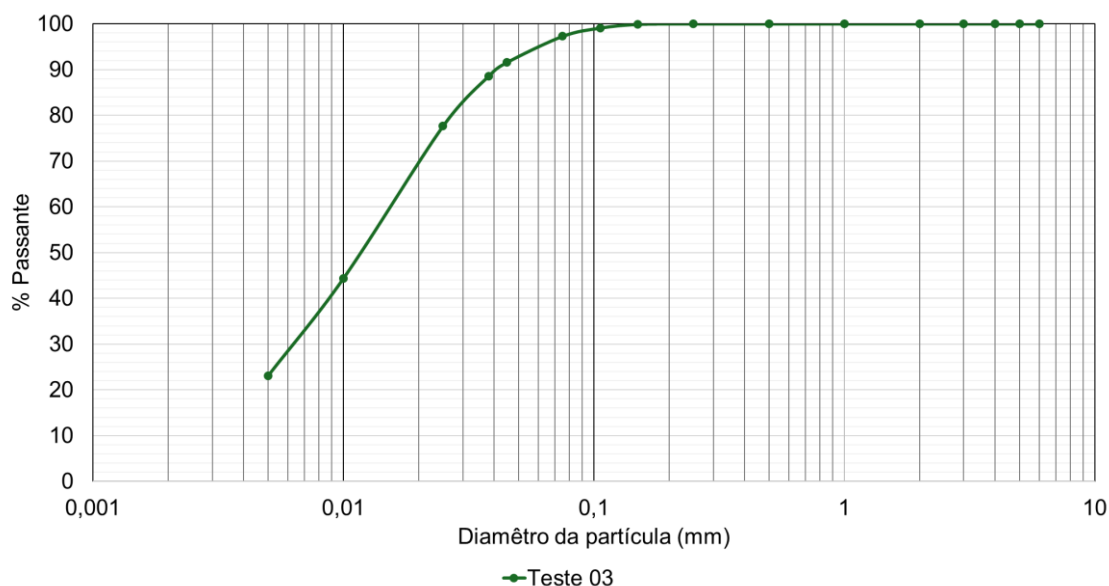
**Figura 25:** Média de redução do volume de espuma (%) em função da dosagem dos sais.

Pela Figura 26, temos que para os três sais testados a melhor dosagem foi de 40g/m<sup>3</sup>. Dessa forma um terceiro teste será realizado associando os sais com os antiespumantes para avaliação da efetividade dos reagentes com sais. Como o CaCl<sub>2</sub> foi o que apresentou melhor performance para abatimento de espuma, o terceiro teste, (TESTE 03) será realizado associando os antiespumantes com CaCl<sub>2</sub> na dosagem de (40g/m<sup>3</sup>).

### 5.3. TESTE 03: influência do sal CaCl<sub>2</sub> na ação dos antiespumantes

#### 5.3.1. Estudos de Caracterização

Antes de realizar os testes de bancada, foi coletada uma amostra para análise de caracterização, com o objetivo de comparar a qualidade dos resultados com os testes previamente realizados, no que tange a química e granulometria, Figura 27. Essa comparação permite identificar eventuais variações cíclicas ou sazonais que possam influenciar os resultados, assegurando maior confiabilidade no processo de avaliação.



**Figura 26:** Distribuição granulométrica da amostra do TESTE 03.

A análise granulométrica da amostra coletada no TESTE 03 indica se tratar de uma amostra fina, com aproximadamente 40% retido em 0,010 mm. Essa amostra se assemelha às coletadas antes dos testes de bancada denominados TESTE 01 e TESTE 02. Os resultados de granulometria que geraram o gráfico estão dispostos na Tabela 17.

**Tabela 16:** Distribuição granulometria da amostra de rejeito do TESTE 03, comparativo com TESTE 01 e 02.

Nome	Faixa	2	1	0,5	0,25	0,15	0,106	0,075	0,045	0,038	0,025	0,010	0,005	-0,005
TESTE 03: amostra overflow	GLOBAL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	1,8	5,7	3,0	10,9	33,3	21,3	23,1
TESTE 02: amostra overflow	GLOBAL	0,0	0,0	0,0	0,2	0,5	0,9	1,9	5,7	3,1	10,4	31,9	21,7	23,7
TESTE 01: amostra overflow	GLOBAL	0,0	0,0	0,2	1,2	1,4	1,8	3,2	8,5	4,0	12,2	30,7	18,0	18,8

A partir da amostra coletada foi analisado a composição química por faixa granulometria, conforme disposto na Tabela 18.

**Tabela 17:** Composição química por faixa de tamanho do overflow no TESTE 03.

Nome	Faixa	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
TESTE 03: Overflow ciclone	GLOBAL	31,360	45,830	0,087	4,790	0,319	0,146	0,180	0,524	2,320
	+0,075mm	24,800	56,340	0,065	4,070	0,309	0,081	0,137	0,587	2,480
	+0,045mm	11,960	79,700	0,019	1,820	0,091	0,041	0,056	0,784	0,690
	-0,045mm	32,860	44,220	0,082	5,140	0,321	0,124	0,187	0,673	2,370

A qualidade do minério no dia amostrado apresenta presença elevada de contaminantes com alumina ( $Al_2O_3$ ) chegando a quase 5%. O PPC (Perda por Calcinação) é um parâmetro usado para determinar a quantidade de substâncias voláteis presentes em uma amostra, como por exemplo os carbonatos. Nesse caso, o PPC indica a quantidade de material perdido quando a amostra é aquecida a uma temperatura alta (geralmente entre  $900^{\circ}C$  e  $1000^{\circ}C$ ), durante a detonação. Esse resultado indica a presença de contaminantes hidratados 2,32%, porém resultados próximos principalmente da amostra do TESTE 02.

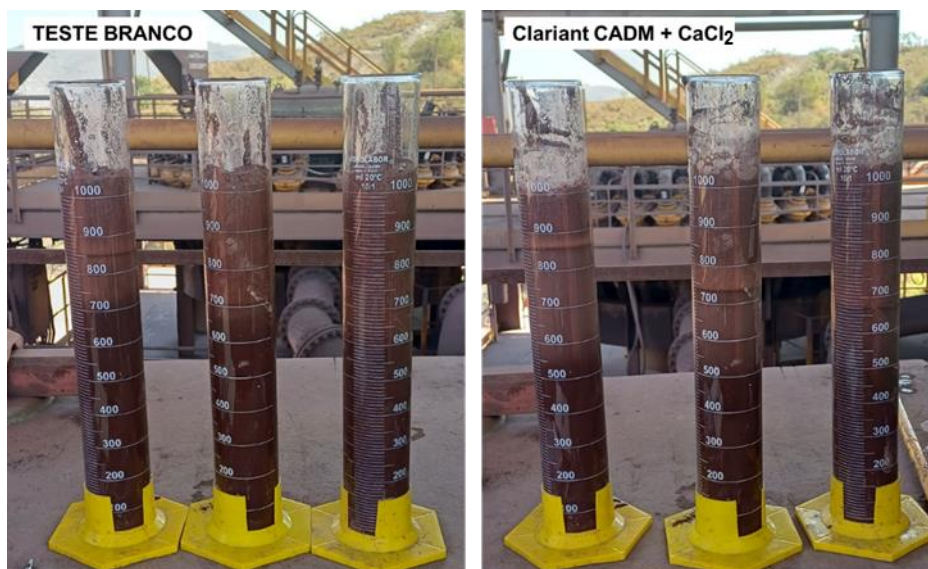
### 5.3.2. Teste de bancada: avaliação da espuma

De acordo com a metodologia aplicada, o TESTE 03 teve como objetivo avaliar o efeito dos sais em combinação com o antiespumante. Assim como nos TESTES 01 e 02, o TESTE 03 foi realizado por meio da coleta de amostras no overflow da bateria de ciclones 05 (CI1872CC05). Durante o experimento, o equipamento operou com uma pressão de  $2,4 \text{ kgf/cm}^2$  e uma vazão de alimentação de aproximadamente  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ . Quanto aos reagentes, foi utilizado o sal  $CaCl_2$  na dosagem específica de  $40 \text{ g/m}^3$  juntamente com os antiespumantes na mesma dosagem específica,  $40 \text{ g/m}^3$ . Os reagentes foram dosados em seringas diferentes, porém ao mesmo tempo. Os resultados serão dispostos a seguir.

**Tabela 18:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com Clariant CADM +  $CaCl_2$ .

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE $40 \text{ g/m}^3$			Redução para teste branco		densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	926	1000	200	350	1000	150	300	-50	-25%	1,09	12%
2	845	1000	250	330	1000	270	300	20	8%	1,16	20%
3	810	1050	300	240	1050	340	220	40	13%	1,14	18%

Pelo resultados expostos na Tabela 19, ao realizar a mistura do  $\text{CaCl}_2$  com o antiespumante CADM não foi identificado melhora significativa no abatimento da espuma. Os resultados dos reagentes individuais contribuíram para o abatimento, porém ao misturá-los esse abatimento não foi identificado, conforme Figura 28 .



**Figura 27:** Aspectos da polpa e espuma nos testes branco e testes após dosagem CADM +  $\text{CaCl}_2$ .

A imagem na Figura 28, dos testes antes e após a dosagem dos reagentes, evidencia o comportamento exposto na tabela, com ausência de abatimento na espuma. Essa mesma condição foi observada pelos testes com o antiespumante CS6170, descritos na Tabela 20, abaixo.

**Tabela 19:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com Solenis CS6170 +  $\text{CaCl}_2$ .

	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		Densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	657	1000	450	250	950	400	200	-50	-11%	1,19	24%
2	756	1000	350	300	1000	350	350	0	0%	1,16	21%
3	777	1000	350	400	1000	350	350	0	0%	1,20	24%



**Figura 28:** Aspectos da polpa e espuma nos testes branco e com dosagem de CS6170 + CaCl<sub>2</sub>.

A Figura 29 indica o aspecto dos testes antes e após a dosagem dos reagentes e evidencia a condição exposta na tabela, no qual a mistura dos reagentes não apresentou efeito no abatimento de espuma. O que pode ser observado é uma tendência de redução da turbidez do clarificado, que está entre a espuma formada e o sólido parcialmente sedimentado.

Na Tabela 21 tem apresentado os resultados da associação do antiespumante Solenis Logos 1092 + CaCl<sub>2</sub>.

**Tabela 20:** Parâmetros da polpa e espuma obtidos com Solenis Logos 1092 + CaCl<sub>2</sub>.

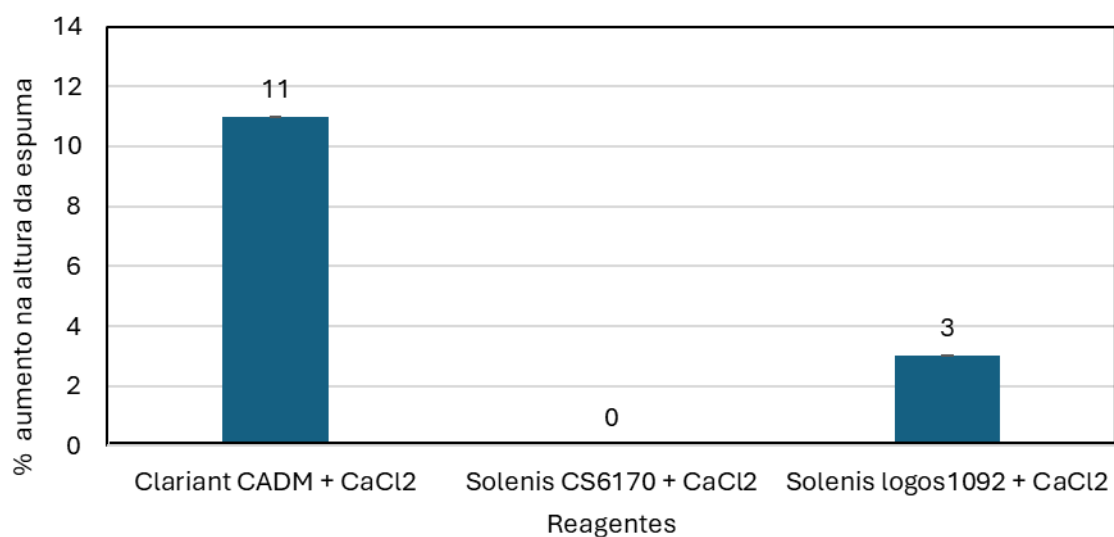
	TESTE BRANCO				COM REAGENTE 40 g/m <sup>3</sup>			Redução para teste branco		Densidade	
	massa proveta	polpa total	camada espuma	sólido aparente	polpa total	camada espuma	sólido aparente			Densidade	%sólido
	[g]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[mL]	[ml]	%	[t/m <sup>3</sup> ]	[%]
1	596	1000	400	200	900	400	250	0	0%	1,19	24%
2	841	1000	250	280	1000	250	300	0	0%	1,12	16%
3	873	1000	230	300	1000	250	400	-20	9%	1,16	21%

A Figura 30 apresenta os resultados dos testes com anti-espumante Solenis Logos 1092 + CaCl<sub>2</sub>.



**Figura 29:** Aspectos da polpa e espuma nos testes branco e teste após dosagem de Logos 1092 +  $\text{CaCl}_2$ .

O antiespumante Logos 1092, assim como os CS6170, apresentou apenas uma redução da turbidez do clarificado na presença de  $\text{CaCl}_2$ . Quanto ao abatimento de espuma, tal condição não se mostrou eficaz, comparando à dosagem dos reagentes separadamente. A Figura 31 tem-se os resultados médios obtidos para os testes com anti-espumante associados ao  $\text{CaCl}_2$ .



**Figura 30:** Aumento de volume da espuma médio para mistura de  $\text{CaCl}_2$  e antiespumantes.

A presença dos sais (que eleva a força iônica) reduz a ação dos antiespumantes. Os sais podem alterar a solubilidade dos compostos presentes na espuma e dos próprios agentes antiespumantes. Dependendo do tipo e da concentração dos íons presentes, a solubilidade dos componentes pode aumentar ou diminuir, afetando a capacidade do antiespumante de dispersar ou romper a espuma.

Os sais podem modificar a tensão superficial da solução. A espuma é uma estrutura formada por bolhas de gás estabilizadas por uma camada líquida. Os antiespumantes atuam diminuindo a estabilidade dessas bolhas, e a tensão superficial é um fator crucial nesse processo. Certos íons podem aumentar a tensão superficial, tornando mais difícil a formação de espuma, enquanto outros podem ter o efeito oposto (OBISESAN *et al.*, 2021).

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permite traçar as seguintes conclusões:

- Embora o Clariant CADM tenha apresentado menor abatimento quantitativo de espuma, qualitativamente ele promoveu maior instabilização da espuma, o que é um resultado relevante, pois forças mecânicas, como a aplicação de spray de água, poderiam resultar na sua completa eliminação.
- O antiespumante Logos 1092 mostrou o melhor desempenho no abatimento de espuma.
- Todos os sais testados demonstraram capacidade de abatimento de espuma, mas o  $\text{CaCl}_2$  se destacou, especialmente na dosagem de  $40 \text{ g/m}^3$ , onde obteve o melhor desempenho.
- A combinação de  $\text{CaCl}_2$  com outros reagentes antiespumantes não resultou em variação significativa na espuma, o que indica uma redução na efetividade do antiespumante.
- Individualmente, todos os reagentes avaliados poderiam ser utilizados no combate à espuma durante o espessamento de lamas; no entanto, o Logos 1092 mostrou-se mais eficaz para a condição específica da polpa analisada.
- Os resultados indicam que a presença de sais na água de processo pode ser um fator significativo que compromete a eficácia dos reagentes no controle da espuma no espessador. O uso de água de processo com elevada força iônica pode, então, diminuir a eficiência dos reagentes no abatimento da espuma.

## 7. TRABALHO FUTUROS

Como trabalhos futuros, recomenda-se:

- Avaliar a capacidade de abatimento de espuma dos antiespumantes preparadas com água de processo e com água nova.
- Avaliar abatimento de espuma com diferentes mineralogias.

## REFERÊNCIAS

MATIOLO, E.; COUTO, H. J. B.; LIMA, N.; SILVA, K.; FREITAS, A. S. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. **Minerals Engineering**. v. 158, 2020.

LEITE, A. M. C.; REIS, E. L. Cationic starches as flocculants of iron ore tailing slime. **Minerals Engineering**. v. 158, 2020.

SERVI, S.; LOTERO, A.; SILVA, J. P. S.; BASTOS, C.; CONSOLI, N., C. Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. **Construction and Building Materials**, v. 349, 2022.

ZHAO, J.; NI, K.; SU, Y.; SHI, Y. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 286, 2021.

ARJMAND, R.; MASSINAEI, M.; BEHNAMFARD, A. Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. **Journal of Water Process Engineering**, v. 31, 2019.

GLADMAN, B.J.; USHER, S.P.; SCALES, P. J. Understanding the Thickening Process. Paste, 2006. ISBN 0-9756756-5-6.

Wang, X.; CUI, B.; WE, D.; SONG, Z.; HE, Y.; BAYLY, A. E. CFD simulation of tailings slurry thickening in a gravity thickener. **Powder Technology**, v. 392, p. 639-649, 2021.

FRANÇA, S.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2018. p. 597-647.

WU. A.; WANG. Y.; WANG. H. Estimation model for yield stress of fresh uncemented thickened tailings: Coupled effects of true solid density, bulk density, and solid concentration. **International Journal of Mineral Processing**, v. 143, p. 117-124. 2015.

DING, Z.; YIN, Z.; LIU, L.; CHEN, Q. Effect of grinding parameters on the rheology of pyrite–heptane slurry in a laboratory stirred media mill. **Minerals Engineering**, v. 20, p. 701–709. 2007.

WANG, D.; ZHANG, Q.; XIAO, C.; FENG, Y.; QIU, J.; ZHU, L.; CHEN, Q. Investigation of flocculation behavior of tailings during settling-concentration: influence of true density, particle size, and mud layer height. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 26, p. 6769-6781. 2023.

NAJAFABADI, Z. R.; SOARES, J. B. P. Flocculation and dewatering of oil sands tailings with a novel functionalized polyolefin flocculant. **Separation and Purification Technology**, v. 274, 2021.

Ruan, Z.; Wua, A.; Bürger, R.; Betancourt, F.; Yiming Wang; Wang, Y.; Jiaoa, H.; Wang, S. Effect of interparticle interactions on the yield stress of thickened flocculated copper mineral tailings slurry. **Powder Technology**, v. 392, 278–285. 2021.

WEI, H.; BOQIANG, G.; REN, J.; LI, A.; YANG, W. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. **Water Research**, v. 143 p. 608-631. 2018.

RESENDE, Alvaro. **Influência da perda por calcinação na sedimentação de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

DENKOV, N. D.; MARINOVA, K. G.; TCHOLAKOVA, S. S. Mechanistic understanding of the modes of action of foam control agents. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 206, p. 57-67.

Karakashev, Si. I.; Grozdanova, M. Foams and antifoams. **Advances in Colloid and Interface Science**. V. 176–177, p. 1-17. 2012.

FALCUCCI A. (2013) Bombeamento de espumas minerais. In: Anais do 43º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO E 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, Belo Horizonte, MG, Brasil, p.44-56.

HENRIQUE DIAS GATTI TURRER, H. D. G.; MACHADO, L. C.; NASCIMENTO, C. M.; MARTINS, R. R.; PEREIRA, P. M. M.; DUARTE, B. B. O.; SOARES, R. L.; RUSSO, J. F. C.. Desenvolvimento de reagentes para controle da estabilidade de espuma numa usina de produção concentrado de minério de ferro. **ABM**, 4ed, 2018.

MATOS, V. E.; NOGUEIRA, S. C. S.; SILVA, G. R.; PERES, A. E. C. Effects of surfactants combination on iron ore flotation. **Minerals Engineering**, v. 190, 2022.

OBISESAN, O.; AHMED, R.; AMANI, M. The effect of salt on stability of aqueous foams. **Energies**, v.14, p. 279, 2021.

BEHERA, M.R.; VARADE, S.R.; GHOSH, P.; PAUL, P.; NEGI, A.S. Foaming in Micellar Solutions: Effects of Surfactant, Salt, and Oil Concentrations. **Ind. Eng. Chem. Res**, v. 53, p. 18497–18507, 2014.

ZHANG, P.; GUO, D.; CAO, X.; XIANG, LI; XIA, W.; PENG, W.. Foam stability: The key to inhibiting slug generation in gas–liquid flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 218, 2022.

Kumar, M.; Ghosh, P. Coalescence of Air Bubbles in Aqueous Solutions of Ionic Surfactants in Presence of Inorganic Salt. **Chem. Eng. Res. Des.**, v. 84, p. 703–710, 2006.

COSTA, Julio César. Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROCHA, G. GONÇALVES, G. RAMOS, K. COTA, T. LIMA, R. Caracterização física, química e mineralógica de uma amostra de minério de ferro de Brucutu. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 16 , p. 88-94, 2019.

JEWELL, R.J.; FOURIE, A.B. **Paste and Thickened Tailings – A Guide**. 3 ed. Australia: ACG, 2006.