



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
CAMPUS OURO BRANCO
BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Mateus Lizardo Pessoa Barbosa

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE DOSAGEM DE
FLOCULANTE EM UM ESPESSADOR DE REJEITO

Ouro Branco

Dezembro de 2023

MATEUS LIZARDO PESSOA BARBOSA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE DOSAGEM DE
FLOCULANTE EM UM ESPESSADOR DE REJEITO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Ouro Branco para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Carlos Ferreira.

Ouro Branco

Dezembro de 2023

B238i Barbosa, Mateus Lizardo Pessoa.

Implementação de um sistema automático de dosagem de floculante em um espessador de rejeito [manuscrito] / Mateus Lizardo Pessoa Barbosa. – 2024.

42 f. : il. color.

Orientador: Carlos Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2024.

1. Espessador de rejeito. 2. Floculante. 3. Underflow. 4. Recirculação de água. 5. Sedimentação. I. Ferreira, Carlos. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. III. Título.

CDU 622.3

Catálogo: Rosângela Marques de Souza - CRB-6/2126

DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 05/12/2023, às 19:00 horas, o aluno MATEUS LIZARDO PESSOA BARBOSA do curso de Bach. Eng. Metalúrgica turma 2017/1 do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o () TCC I (x) TCC II e foi APROVADO (aprovado/reprovado) com a nota 8,50, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC. Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 04/01/2024.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada **zero e a sua defesa será anulada**. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes da defesa:

Correções conforme orientações e recomendações da banca.

DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Mateus Lizardo Pessoa Barbosa, estudante do curso Engenharia Metalúrgica do IFMG – Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG – Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Assinatura do aluno: Mateus Lizardo Pessoa Barbosa

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: Carlos Roberto Ferreira Assinatura: [Assinatura]

Membro 2: Nome: TAMIRIS FONSECA DE SOUZA Assinatura: [Assinatura]

Membro 3: Nome: Antonio Marcos Barros Silva Assinatura: [Assinatura]

Membro 4: Nome: _____ Assinatura: _____

Membro 5: Nome: _____ Assinatura: _____

Aluno: Nome: _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de executar este trabalho.

Ao meu pai, Reinaldo, e à minha mãe, Ana Cláudia, pelo incentivo.

À minha esposa, Ana Carla, pelo apoio.

Ao Carlos Ferreira pela orientação neste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Minério de ferro – contextualização geral	13
3.2 Beneficiamento mineral.....	15
3.2.1 <i>Circuito de concentração da mineradora em estudo</i>	16
3.3 Espessamento	17
3.3.1 <i>Tipos de espessadores</i>	19
3.4 Floculante	23
3.4.1 <i>Fatores que podem influenciar na eficiência da floculação</i>	25
3.5 Ensaio de sedimentação.....	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Definição do problema.....	28
4.2 Metodologia	29
4.3 Fluxograma do trabalho	30
4.4 Coleta de amostra	31
4.5 Análise granulométrica	32
4.6 Análise química	32
4.7 Testes de sedimentação	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1 Análise granulométrica	35
5.2 Análise química	35
5.3 Testes de sedimentação	36
5. CONCLUSÃO	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mineração em números	10
Figura 2 - Mapa com a localização dos principais municípios e minas do Quadrilátero Ferrífero	14
Figura 3 - Circuito de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero.....	17
Figura 4 - Espessador convencional de uma mineradora do quadrilátero ferrífero ...	19
Figura 5 - Dispositivo feedwell.....	20
Figura 6 - Características de um espessador contínuo convencional	21
Figura 7 - Espessador de alta capacidade	22
Figura 8 - Espessador de lamelas.....	23
Figura 9 - Tipos de estruturas das cadeias poliméricas do floculante. (a) cadeia linear; (b) com cadeias contendo ramificações primárias; (c) ramificações mistas (primária e secundária)	24
Figura 10 - Processo de dissolução completo de floculante	26
Figura 11 - Teste de proveta e sua curva de sedimentação	27
Figura 12 - (a) espessador com alta turbidez, (b) processo manual de dosagem de floculante	28
Figura 13 - Etapas para implementação do sistema de dosagem de floculante automático.....	29
Figura 14 - Fluxograma de um sistema de dosagem de floculante automático	31
Figura 15 - Amostras coletadas.....	31
Figura 16 - Equipamentos e processos utilizados na análise granulométrica. (a) filtro prensa, (b) processo de secagem da amostra, (c) amostra úmida na chapa térmica, (d) divisor rifles e (e) peneiramento a úmido.....	32
Figura 17 - Equipamentos utilizados na análise química. (a) moinho pulverizador, (b) cadinho de platina, (c) máquina de fusão e (d) amostra cristalizada	33
Figura 18 - Testes de sedimentação	34
Figura 19 - Resultado da análise e curva granulométrica.....	35
Figura 20 - Velocidade de sedimentação das amostras com diferentes dosagens de floculantes	37
Figura 21 - Resultado de Turbidez para as amostras.....	37
Figura 22 - Resultado de compactação de sólidos por litro de polpa	38

Figura 23 - (a) overflow antes da implementação do equipamento, (b) e (c) coleta do overflow depois da implementação do espessador de rejeito 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção minério de ferro.....	13
Tabela 2 - Classificação dos principais polímeros (floculantes), conforme características.....	24
Tabela 3 - Relação de frequência x vazão de floculante	30
Tabela 4 - Resultado da análise química.....	36
Tabela 5 - Dados técnicos.....	36
Tabela 6 - Resultados de teste de sedimentação	36
Tabela 7 - Comparação de dosagem e diluição antes e depois da implementação do equipamento.	39

RESUMO

A indústria mineral consome uma quantidade considerável de água nos processos de beneficiamento mineral, o que pode resultar em impactos ambientais significativos se a água for utilizada de forma inadequada. Com o objetivo de reduzir esses impactos ambientais e os custos na mineração, as empresas têm adotado políticas de reutilização de água. Nesse contexto, foi observada uma baixa eficiência operacional em um espessador de rejeito em uma mineradora no Quadrilátero Ferrífero, devido a dosagens de floculante ou de reagentes em geral inadequadas, comprometendo a eficiência do processo. As consequências da recirculação de água com elevada turbidez, incluem aumento do consumo de água, custos operacionais elevados, obstrução dos jatos *spray* na separação magnética e entupimento dos bicos injetores de água usada para lavagem do minério nas peneiras. Diante desses problemas, este trabalho tem como objetivo solucioná-los ou atenuá-los por meio da adequação de um sistema automático de dosagem de floculante no espessador de rejeito. Optou-se pela metodologia de execução de projeto, que visou estudar meios de automatizar o sistema de dosagem de floculante no espessador, melhorando a eficiência operacional e prevenindo problemas na recuperação e recirculação da água no circuito de mineração. Para a implementação desse projeto, foram realizados testes de caracterização química, granulométrica e sedimentação na amostra, no qual foram essenciais para a validação e funcionamento da adaptação do sistema automático de dosagem de floculante no espessador. Os resultados dos testes de caracterização química e granulométrica indicaram uma predominância de partículas, finas, da ordem de 0,045 mm na amostra do rejeito, além de um alto teor de ferro ordem de 31,23%. Através dos testes de sedimentação, determinou-se que a dosagem mais eficaz para o equipamento dosador é de 25 g/ton, resultando em melhor turbidez, compactação e velocidade de sedimentação. Com base nos resultados obtidos em laboratório implementou-se o sistema no espessador industrial obtendo um líquido clarificado com turbidez de 54,6 NTU, pode-se concluir que a implementação do equipamento foi bem-sucedida, apresentando desempenhos satisfatórios em sua operação, tais como eficiência operacional, garantia de recirculação de água clarificada, e uma redução significativa nos custos operacionais.

Palavras-chave: Espessador de rejeito, floculante, *underflow*, recirculação de água, sedimentação.

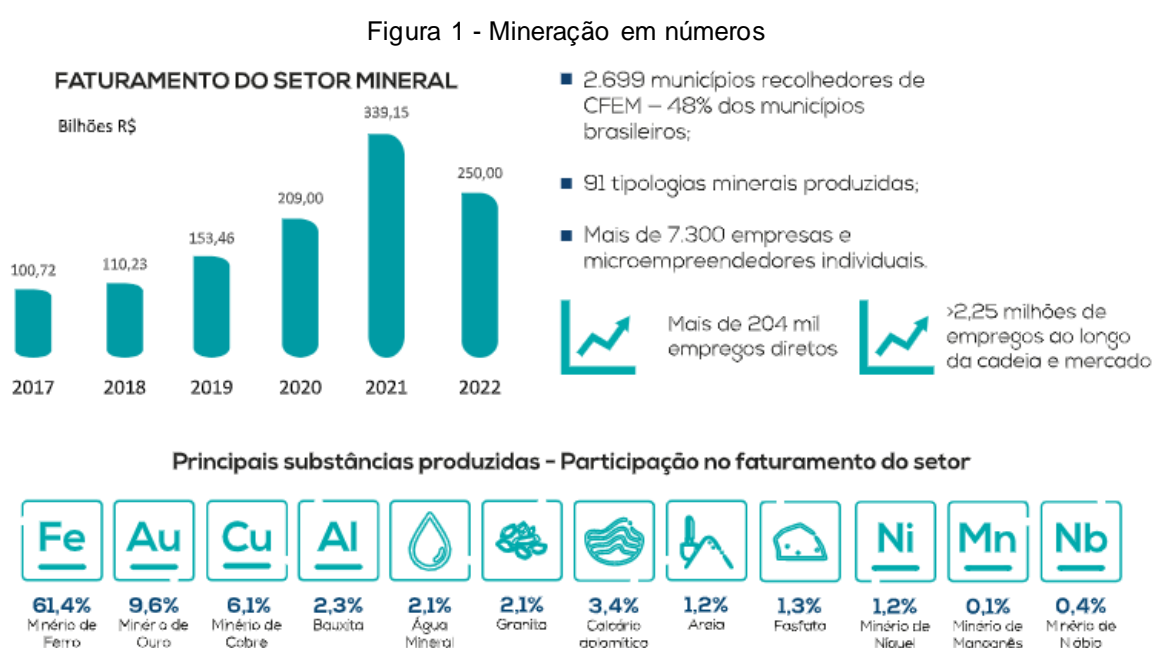
ABSTRACT

The mineral industry consumes a considerable amount of water in mineral beneficiation processes, which can result in significant environmental impacts if water is used improperly. In order to reduce these environmental impacts and mining costs, companies have been adopting water reuse policies. In this context, low operational efficiency was observed in a tailings thickener at a mining company in the Iron Quadrangle, due to inadequate dosages of flocculant or reagents in general, compromising the efficiency of the process. The consequences of recirculating water with high turbidity include increased water consumption, high operational costs, obstruction of spray jets in magnetic separation, and clogging of water injection nozzles used for ore washing on screens. In view of these problems, this work aims to solve or mitigate them by adapting an automatic flocculant dosing system in the tailings thickener. The project execution methodology was chosen to study ways to automate the flocculant dosing system in the thickener, improving operational efficiency and preventing problems in water recovery and recirculation in the mining circuit. For the implementation of this project, tests of chemical, granulometric, and sedimentation characterization were carried out on the sample, which were essential for the validation and operation of the adaptation of the automatic flocculant dosing system in the thickener. The results of the chemical and granulometric characterization tests indicated a predominance of fine particles, on the order of 0.045 mm in the tailings sample, in addition to a high iron content of approximately 31.23%. Through sedimentation tests, it was determined that the most effective dosage for the dosing equipment is 25 g/ton, resulting in better turbidity, compaction, and sedimentation velocity. Based on the results obtained in the laboratory, the system was implemented in the industrial thickener, obtaining a clarified liquid with a turbidity of 54.6 NTU. It can be concluded that the equipment implementation was successful, presenting satisfactory performances in its operation, such as operational efficiency, assurance of recirculation of clarified water, and a significant reduction in operational costs.

Key words: Tailings thickener, flocculant, *underflow*, water recirculation, sedimentation

1. INTRODUÇÃO

A mineração contribui de maneira relevante para a economia brasileira. Segundo o IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, em 2022 o setor foi responsável por gerar US\$41,7 bilhões em exportações, destacando o minério de ferro que teve 344,1 milhões de toneladas exportadas, contribuindo para o setor com US\$28,9 bilhões. Em relação ao mercado de trabalho, o setor foi responsável no ano de 2022 por 204 mil empregos no país, destacando o minério de ferro que corresponde cerca de 61,4% do faturamento do setor segundo a Figura 1 (IBRAM, 2022).



Fonte: (IBRAM, 2022).

Apesar da grande extração anual de minério de ferro, há escassez das jazidas de minério de alto teor, destacando a região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, onde predomina o minério itabirítico. Assim, se faz necessário o beneficiamento para aumentar o teor de ferro do minério e, como consequência, agregar qualidade.

A indústria mineral utiliza um volume significativo de água no processo de beneficiamento mineral, o que pode gerar grande impacto ambiental caso a água seja utilizada incorretamente. Com o objetivo de reduzir o impacto ambiental e o custo na mineração, as empresas têm empregado políticas de reutilização de água, visando a sustentabilidade e recuperação da mesma para ser reutilizada no processamento mineral.

Um dos equipamentos amplamente utilizados na etapa de beneficiamento é o espessador de rejeito, empregado para separar sólidos de líquidos. Assim, obtém-se um rejeito mais denso, fazendo com que o resíduo mineral seja processado de forma mais eficiente, reduzindo a quantidade de água utilizada e a necessidade do descarte da água com elevada turbidez.

O processo de separação sólido líquido no beneficiamento mineral envolve a adição de polímeros, que realizam a aglomeração das partículas sólidas do rejeito, tornando-as mais fáceis de separar da água. Um dos polímeros amplamente utilizados em espessadores é o floculante, responsável por aglomerar partículas finas e formar flocos maiores, gerando a separação sólido-líquido. No entanto, uma dosagem inadequada desse polímero pode comprometer a eficiência do processo, gerando a recirculação da água com elevado percentual de sólidos no circuito de beneficiamento. Portanto, é necessário um controle adequado e eficiente da dosagem de floculante no espessador, para que o mesmo possa garantir confiabilidade no processo.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a adequação de um sistema de dosagem de floculante, mais eficiente e confiável em um espessador de rejeito em uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero. Para isso foi realizado a adaptação de um equipamento de dosagem de polímero, automático, no espessador. Esse sistema foi validado mediante testes de sedimentação nas amostras coletadas, a fim de verificar a eficiência da modificação na dosagem de floculante.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar a implementação de um sistema automático de dosagem de floculante em um espessador de rejeito utilizado na etapa de separação sólido - líquido.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar meios de automatização, de um sistema para dosagem de floculante, em um espessador de rejeitos de minério de ferro;
- Melhorar a eficiência operacional na dosagem de floculante no espessador de rejeito;
- Estudar o efeito do uso do floculante na turbidez do clarificado;
- Realizar análise granulométrica e química da amostra;
- Realizar testes de sedimentação na amostra coletada;
- Avaliar custo operacional pós mudança;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de ferro – contextualização geral

Na indústria, a obtenção do elemento ferro ocorre exclusivamente a partir de rochas minerais. Esse metal é o quarto elemento mais comum na crosta terrestre, representando cerca de 4,5% de sua massa, ficando atrás apenas do oxigênio, silício e alumínio. Os minérios de ferro explorados economicamente podem ser classificados com base na composição química do mineral que contém o elemento metálico. São classificados como óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Dentre esses, apenas a exploração dos óxidos apresenta relevância econômica para a produção de ferro (CARVALHO, MOSZKOWICZ, *et al*, 2014). A Tabela 1 detalha a produção do minério de ferro nos anos de 2012 e 2022.

Tabela 1 - Produção minério de ferro

PRODUÇÃO	MILHÕES DE TONELADAS	MILHÕES DE TONELADAS
Pais	Ano (2012)	Ano (2022)
Austrália	521	900
Brasil	380	398
China	1.310	360
Índia	144	240
Rússia	105	100
Ucrânia	82	81
Canadá	39	68
África do Sul	63	61

Fonte: Adaptado (GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA, 2023)

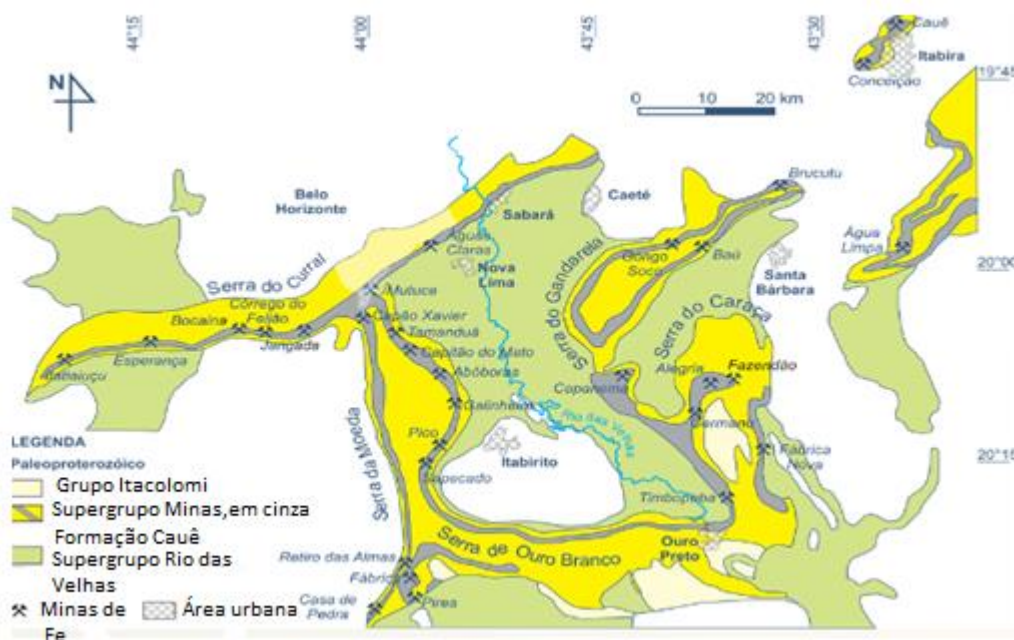
No Brasil, as principais áreas de produção de minério de ferro incluem o Quadrilátero Ferrífero, Carajás (Sudeste do Pará) e a região de Corumbá, localizada em Mato Grosso do Sul, onde são encontrados depósitos de minério do tipo itabirítico

e hematítico respectivamente. Os minérios de ferro explorados comercialmente no país recebem as seguintes denominações: itabirito, hematita e canga (CARVALHO, MOSZKOWICZ,2014).

O minério de ferro extraído na região do Quadrilátero Ferrífero pode ser classificado em dois grupos principais: minério itabirítico e minério hematítico. O minério itabirítico é caracterizado pela presença alternada de camadas compostas por óxidos de ferro e camadas compostas por sílica, com teores de ferro que variam de 20% a 55% de ferro (Fe) total (CARVALHO, MOSZKOWICZ,2014).

Os depósitos de minério hematítico são mais uniformes, compostos principalmente por hematita e, portanto, possuem altos teores de ferro, acima de 64%. Esses depósitos ocorrem em diferentes proporções, formando lentes imersas nas camadas de itabirito (CARVALHO, MOSZKOWICZ, *et al*,2014.). O Quadrilátero Ferrífero é uma das regiões mais importantes do setor de mineração no Brasil, corresponde a uma área de aproximadamente 7.000 km². A Figura 2 detalha o mapa geológico simplificado e a localização principais minas e municípios do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 2 - Mapa com a localização dos principais municípios e minas do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Adaptado (CAXITO e DIAS,2018)

3.2 Beneficiamento mineral

O beneficiamento mineral é um processo essencial na indústria de mineração, que visa agregar valor no produto e conseqüentemente qualidade. Diante da diminuição das reservas de minério de alto teor, o minério de ferro bruto obtido das minas passou a apresentar cada vez mais impurezas indesejáveis, como sílica, alumina e fósforo. O processo de beneficiamento visa remover essas impurezas, melhorando a qualidade do minério e tornando-o mais adequado para uso industrial. No processo de extração mineral o aspecto econômico é o fator determinante para a operação. É inviável, na prática, alcançar uma separação total dos componentes minerais. Quanto maior for a concentração dos minerais desejados, maior é a perda, ou seja, menor é a eficiência de recuperação (LUZ e LINS, 2010).

A extração do minério de uma mina é realizada por meio de operações de lavra na mina. O produto da mina, o minério bruto, *run-of-mine*, (ROM), é a alimentação da usina de tratamento. As operações unitárias são elementos fundamentais para garantir que o processo de beneficiamento mineral seja realizado de maneira eficiente, essas etapas são classificadas em:

Cominuição: engloba uma variedade de técnicas com o objetivo de reduzir o tamanho do minério para fragmentos menores, para alimentar os outros processos de beneficiamento. A britagem é a primeira etapa de fragmentação, na qual os blocos de minério extraídos são fragmentados em blocos menores, utilizando britadores de mandíbula, giratórios e cônicos, até obter um material adequado para a etapa de moagem. A moagem é a etapa de fragmentação fina, na qual é obtido um produto adequado para o processo de concentração (FIGUEIRA, LUZ e ALMEIDA, 2010).

Separação por tamanho: a avaliação da qualidade da fragmentação e granulometria desejada é realizada por meio da separação por tamanho. A separação de um determinado material em frações com tamanhos de partículas diferentes é o objetivo do processo de peneiramento. No peneiramento, considera-se o tamanho geométrico das partículas, utilizando principalmente peneiras vibratórias, podendo ser realizado tanto a seco quanto a úmido. Para a classificação de partículas mais finas, são empregados, por exemplo, classificadores espirais (CORREIA, 2010).

Concentração: visa aumentar o teor do elemento ou composto químico de interesse no minério para se obter um produto com maior qualidade. As técnicas mais utilizadas

para concentração são a concentração gravítica, a flotação e a separação magnética. Nos minérios em que a magnetita é o mineral-minério predominante, a flotação é empregada em conjunto com a concentração magnética de baixa intensidade, a fim de atender aos requisitos de teores extremamente baixos de impurezas. No caso de minérios não magnéticos, as técnicas de concentração também envolvem a aplicação de concentração magnética de alta intensidade e flotação (ROBERTO, 2010).

3.2.1 Circuito de concentração da mineradora em estudo

Na Figura 3 pode se observar um circuito, operacional, de uma mineradora localizada no quadrilátero ferrífero. O ROM é alimentado em um britador primário giratório que reduz o itabirito a uma granulometria na faixa entre 114 e 150 mm. O produto é depositado em pilha de homogeneização montadas em pátios com capacidade de estocagem de 126 mil toneladas por pátio (Arquivo interno da empresa, 2023)

A pilha abastece um silo de alimentação do sistema de peneiramento primário. O material retido no peneiramento primário, com granulometria acima de 40 mm, é direcionado para um processo de britagem secundária em um britador de mandíbulas. O material passante alimenta o peneiramento secundário. A fração de minério retida no peneiramento secundário com granulometria acima de 10 mm, é direcionada para a britagem terciária junto (composta de três britadores) com o produto da britagem secundária. O produto do britador terciário alimenta a pilha do material *sínter feed*. O material retido no peneiramento terciário com granulometria acima de 10 mm, é direcionado para a pilha de granulado.

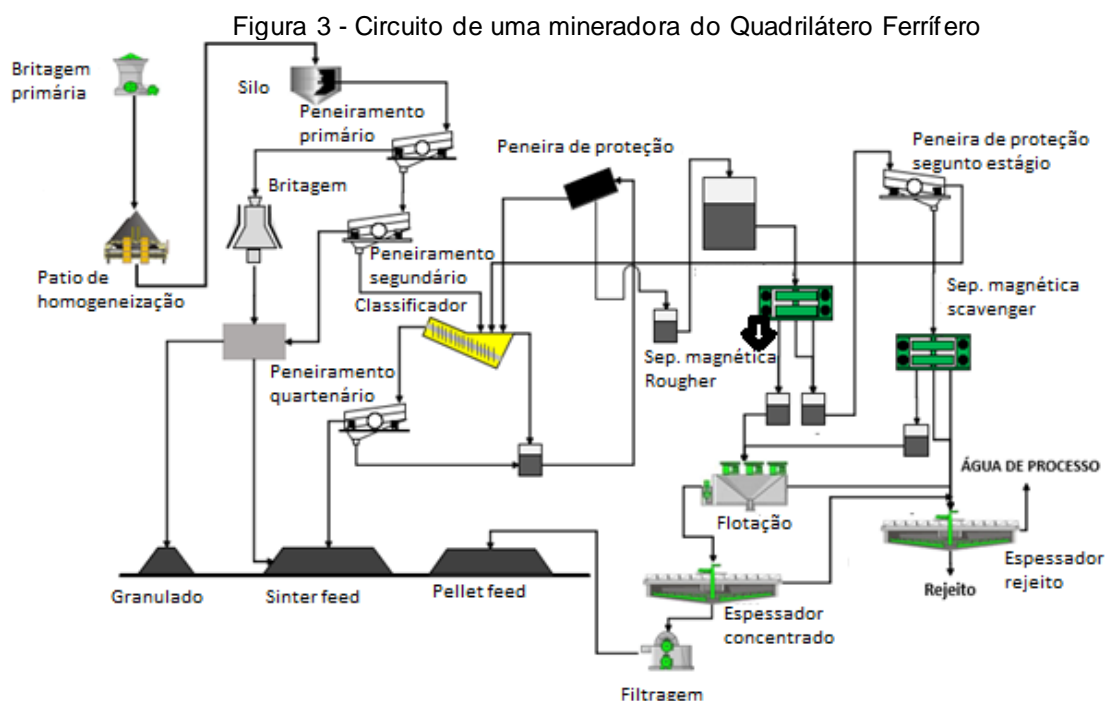
O minério passante no peneiramento secundário alimenta classificadores espirais, onde o *overflow* (material acima de 0,5 mm) é desaguado em peneiras horizontais e encaminhado para a pilha de *sínter feed*. O *underflow* com granulometria abaixo de 0,5 mm, alimenta o circuito de concentração magnética.

O material passa por uma peneira de proteção, cuja função é evitar a entrada de partículas (grossas) no caso específico acima de 2 mm, onde o *oversize* retorna para o classificador espiral, e o *undersize* alimenta a etapa *rougher* (desbaste), da separação magnética, com cinco separadores, modelo carrossel de alta intensidade (7000 T), com *gap* de 3,8 mm.

O separador magnético produz três produtos: um rejeito não ferroso e não magnético, um produto médio que contém partículas mistas de SiO₂ e Fe₂O₃ e por

último um produto de concentrado (Fe_2O_3). O concentrado é encaminhado para a flotação, enquanto o médio e o rejeito passam por uma peneira de proteção com malha de 1 mm. O material passante pela peneira alimenta a etapa *scavenger* (recuperação) com sete separadores, e o material retido pela peneira retorna para o classificador espiral. A etapa *scavenger* também produz os três produtos, sendo que o rejeito e o médio vão para o espessador de rejeito.

A flotação recebe o produto concentrado da separação magnética, onde, por flotação reversa, aumenta o teor de ferro e direciona o material para o espessador de concentrado. Logo em seguida ele é direcionado para filtragem, onde forma o produto *pellet feed* com granulometria $< 0,150$ mm.



Fonte: (Arquivo interno da empresa,2022)

3.3 Espessamento

O espessamento é uma operação unitária de separação sólido/líquido baseada na velocidade de sedimentação das partículas em um meio aquoso pela ação da gravidade. Tem como objetivo produzir um líquido clarificado isento de sólidos, denominado *overflow*, e a geração de uma polpa adensada, *underflow* (LOPES, 2017).

Os espessadores são largamente utilizados nas instalações de beneficiamento de minério de ferro, com as seguintes finalidades: (Arquivo interno da empresa,2023)

- **Espessamento do rejeito ultrafino (lamas):** é, normalmente, uma polpa diluída, sendo seu espessamento necessário para recirculação de água (*overflow*) e adensamento da polpa (*underflow*) para ser aplicada em outra operação unitária (concentração e/ou filtragem) ou simplesmente para disposição em barragens.
- **Espessamento de produto *pellet feed*:** para adequação da concentração de sólidos para a etapa seguinte de filtragem.
- **Recuperação de água para processo produtivo:** atualmente, é comum utilizar os espessadores de concentrado e rejeito para recuperar a água do processo e reutilizá-la. O sobrenadante é tratado e transformado em água de recirculação, contribuindo para a sustentabilidade do processo industrial.

O processo de espessamento de polpas baseia-se na sedimentação, ou seja, na movimentação de partículas sólidas pela água. Tais partículas estão sujeitas às forças da gravidade, empuxo e resistência ao movimento (FRANÇA e MASSARANI, 2010). Algumas variáveis podem influenciar no processo de sedimentação como por exemplo:

- **Tamanho e forma das partículas:** as partículas esféricas ou quase esféricas, se comparado as partículas de formato irregular, sedimentam mais facilmente. Além disso, as partículas de diâmetro maior sedimentam mais rapidamente do que as partículas de menor diâmetro. Partículas mais finas tendem a ficar mais tempo em suspensão.
- **Porcentagem de sólidos:** partículas minerais em um meio fluido são afetadas apenas pela resistência de um líquido ao seu movimento. Quando isoladas ou com poucas partículas, estas descrevem trajetórias descendentes livres e sedimentam. No entanto, a presença de muitas partículas torna difícil a sedimentação, pois a velocidade reduz.
- **Geometria do espessador:** área de espessamento, poço de alimentação, altura lateral útil e inclinação do fundo.

3.3.1 Tipos de espessadores

O espessador é um equipamento normalmente fabricado em concreto armado ou aço. Utiliza-se argila compacta para construir a base do espessador. O aço por ser um material mais econômico, é frequentemente utilizado na construção de espessadores de menor diâmetro. O equipamento é composto por um tanque de formato cilíndrico-cônico, sendo abastecido pelo centro, onde as partículas sedimentam e são removidas pelo fundo (*underflow*), enquanto o líquido clarificado transborda em uma calha ao redor do espessador (*overflow*). Os tipos de espessadores dependem da geometria ou configuração da alimentação do espessador (FRANÇA e MASSARANI, 2010).

Espessador convencional

Um espessador convencional consiste em um tanque cônico de até 150 metros de diâmetro. Sua estrutura ou caixa pode ser instalada no solo, semienterrada, com parte cônica enterrada no solo e seção cilíndrica acima do solo ou elevado. O interior do tanque normalmente possui dois braços longos e dois braços curtos, rotativos, dotados de pás de arraste (*rake*) que transportam os sólidos (sedimentado) até o cone de descarga (FRANÇA e MASSARANI, 2010). A Figura 4 representa a operação de um espessador em uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 4 - Espessador convencional de uma mineradora do quadrilátero ferrífero

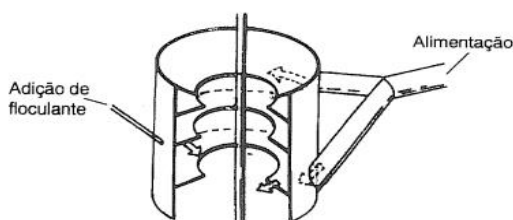


Fonte: (Autor,2023)

A alimentação do espessador é feita por tubulações, onde existe uma peça chamada *feedwell*. Este dispositivo tem a função de dividir a alimentação em vários fluxos em direções opostas, ocasionando a redução da velocidade e turbulência das

partículas. A Figura 5 mostra detalhes sobre sua alimentação (CHAVES, OLIVEIRA, *et al.*, 2004).

Figura 5 - Dispositivo feedwell



Fonte: (CHAVES, OLIVEIRA, *et al.*, 2004)

A Figura 6 apresenta as funções e características de cada componente de um espessador convencional, conforme descrito a seguir: (Arquivo interno da empresa, 2023)

Mecanismo de Rotação: responsável pela rotação do *rake* ou rastelo. Possui um medidor de torque para indicar a força exercida no *rake*. Além disso, os espessadores geralmente possuem um mecanismo mecânico de elevação do braço para evitar danos no braço mecânico, aterramento do espessador e sobrecarga no sistema de acionamento da rotação do *rake*.

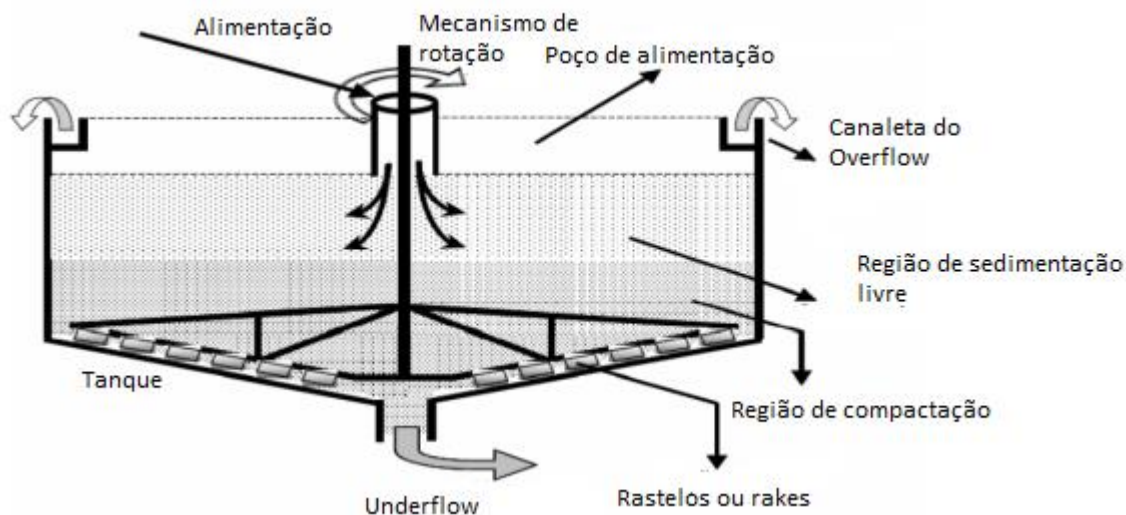
Tanque: local onde ocorre a separação entre sólidos e líquido. A inclinação do fundo do tanque é de 12° para rejeitos ultrafinos e de 14° para concentrado (alimentação de *pellet feed*) ou outros fluxos (por exemplo, alimentação de flotação ou rejeito de flotação) com granulometria semelhante ao concentrado.

Rake: tipo de rastelo cuja função é puxar o material espessado em direção ao centro, direcionando-o para a descarga de *underflow* do equipamento. Também é responsável pelo aumento da densidade do *underflow* e pela manutenção dos sólidos em suspensão, evitando o aterramento do espessador.

Poço de alimentação: local que recebe a polpa de alimentação e o floculante, facilitando o contato e distribuindo-os com fluxo em direções opostas por todo o perímetro do tanque.

Canaleta do *overflow*: calha que circunda todo o espessador, recebendo o *overflow* do espessador e direcionando-o para uma tubulação de descarga ou cascata, que pode estar dentro ou fora do tanque.

Figura 6 - Características de um espessador contínuo convencional



Fonte: (FRANÇA e MASSARANI, 2010)

Espessadores de Alta Capacidade

Os espessadores dessa categoria são bastante similares aos espessadores contínuos tradicionais. Porém, alterações estruturais no projeto, como a inclusão de placas ou a modificação da localização da alimentação suspensa, que simplificam o aumento da capacidade do equipamento. Uma das vantagens desse dispositivo, além do aumento da capacidade, é a facilidade de expansão da área de espessamento sem a necessidade de aumentar o diâmetro. Esse aspecto é altamente atrativo em termos industriais, especialmente levando em consideração o espaço requerido para sua instalação. A Figura 7 mostra um espessador de alta capacidade (LOPES, 2017).

Figura 7 - Espessador de alta capacidade



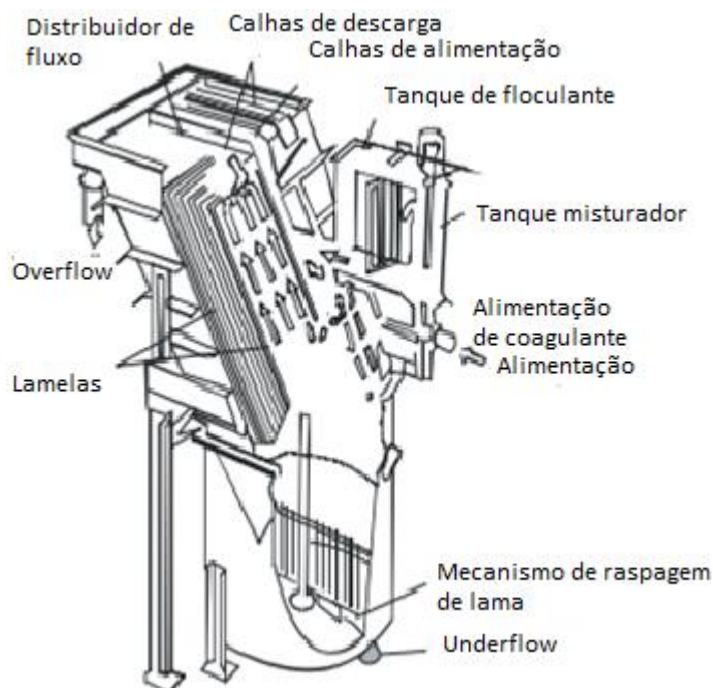
Fonte: (LOPES, 2017)

Espessadores de lamelas

O espessador de lamelas também pode ser considerado como um espessador de alta capacidade e consiste em uma série de placas inclinadas, ou lamelas posicionadas em sequência para criar canais. A vantagem dessa configuração é a otimização de espaço, já que essas unidades possuem uma capacidade de sedimentação significativamente maior em comparação com os espessadores convencionais (LARA,2011)

Em um espessador convencional, as partículas precisam percorrer todo o caminho entre a entrada de alimentação e o fundo do tanque para espessar. No entanto, em um espessador de lamelas, o princípio de funcionamento é completamente distinto. Nessas unidades, a suspensão pode ser diretamente inserida no compartimento de alimentação ou na câmara de mistura e floculação. Os sólidos se depositam sobre as lamelas e deslizam em direção ao fundo do equipamento, formando a camada espessada. Devido ao tempo de residência e baixa vibração mecânica no fundo do equipamento, o material sedimentado é adensado e então bombeado (GUIMARAES, 2010). A Figura 8 mostra os componentes de um espessador de lamelas.

Figura 8 - Espessador de lamelas



Fonte: (FRANÇA e MASSARANI,2010)

Espessador com alimentação submersa

Os espessadores com alimentação submersa, que também são classificados como espessadores de alta capacidade, recebem a alimentação em um ponto localizado dentro da camada compactada dos sólidos. O aumento em sua capacidade é atribuído ao fato de que as partículas em suspensão são introduzidas diretamente na cama de sólidos sedimentados, onde são retidas. O líquido presente na suspensão percola, ascendendo através dessa camada de partículas em direção à região de líquido clarificado. No entanto, nem todas as partículas permanecem retidas na cama de sólidos e, por isso, acima da interface da região compactada, forma-se uma região com concentração sólidos (Arquivo interno da empresa,2023).

3.4 Floculante

Para assegurar um processo efetivo na sedimentação das partículas no espessador, frequentemente são utilizados produtos químicos que estimulam a aglomeração das partículas em agregados maiores e mais densos. De forma geral, os polímeros são compostos químicos de elevado peso molecular, resultantes de

reações químicas de polimerização. As interações entre os polímeros e as partículas em solução podem ocorrer primordialmente devido a forças eletrostáticas, pontes de hidrogênio ou ligações iônicas (RODRIGUES, 2010). A classificação dos flocculantes disponíveis no mercado é baseada em sua natureza, bem como em suas propriedades físicas, químicas, físico-químicas e estruturais, conforme demonstrado na Tabela 2 (RODRIGUES, 2010).

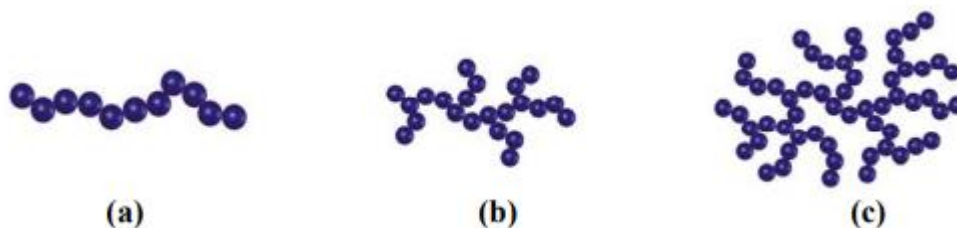
Tabela 2 - Classificação dos principais polímeros (flocculantes), conforme características

Características	Classificação
Natureza	Sintéticos – maioria dos polímeros comerciais Naturais - biopolímeros
Cargas	Catiônicos (cargas positivas) Aniônicos (cargas negativas) Não iônicos (ausência de cargas) Anfóteros (cargas positivas e negativas)
Hidrofobicidade	Hidrofóbicos Hidrofílicos
Peso molecular	Baixo: menor que 10^5 g.mol ⁻¹ Médio: entre 10^5 g.mol ⁻¹ e 10^6 g.mol ⁻¹ Alto: maior que 10^6 g.mol ⁻¹
Estruturas	Lineares Ramificadas

Fonte: (RODRIGUES, 2010)

A grande variedade de polímeros utilizados na indústria é obtida por reações entre monômeros (moléculas orgânicas que formam polímeros sintéticos) que são dispostos em cadeias de forma aleatória na polimerização. Na Figura 9, são ilustradas as estruturas dos polímeros, que podem apresentar-se de três formas distintas: linear, com cadeias contendo ramificações primárias ou com cadeias contendo ramificações mistas, ou seja, ramificações primárias e secundárias (RODRIGUES, 2010).

Figura 9 - Tipos de estruturas das cadeias poliméricas do flocculante. (a) cadeia linear; (b) com cadeias contendo ramificações primárias; (c) ramificações mistas (primária e secundária)



Fonte: (MC CORMICK, 1991)

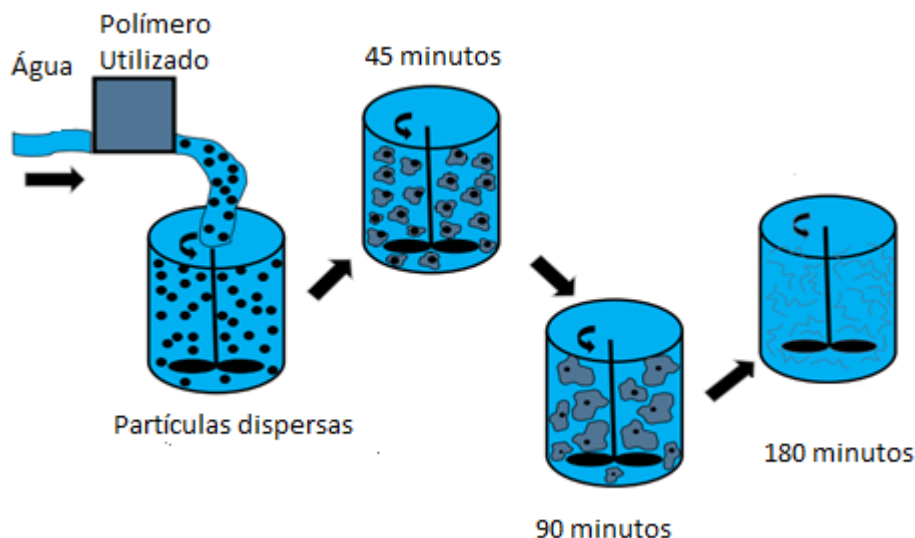
Os polímeros podem ser neutros ou apresentar grupamentos ionizáveis. Nesse caso, são denominados polieletrólitos, os quais podem ser classificados de maneira mais precisa como poliânions ou policátions, variando de acordo com a carga que possuem. Os polieletrólitos aniônicos de cadeia linear e alto peso molecular são os floculantes mais eficazes nas operações de espessamento, em geral, entre 10^6 e 10^7 g/mol. Um dos polímeros neutros mais utilizados na mineração são as poliacrilamidas (PAM) (BALTAR, 2010).

3.4.1 Fatores que podem influenciar na eficiência da floculação

A compreensão e o controle adequados de alguns fatores são essenciais para otimizar a eficiência do processo. A floculação é um processo complexo e depende dos seguintes fatores, para uma boa eficiência na floculação (BALTAR, 2010):

1. **Seleção adequada do agente floculante:** ao selecionar o reagente, é fundamental considerar, em primeiro lugar, o propósito da floculação. Portanto, no processo de espessamento, o tamanho do floco é o aspecto mais relevante. Características como o tamanho da cadeia (peso molecular), carga elétrica (neutra, positiva ou negativa), densidade de carga e propriedades químicas dos grupos ativos da molécula são elementos cruciais a serem considerados ao escolher o floculante.
2. **Forma de aplicação do polímero:** de acordo com a Figura 10, é possível observar o processo de dissolução completa de um floculante polimérico em uma suspensão de água. Esse processo ocorre em várias etapas, incluindo a homogeneização do polímero na suspensão, a adsorção das moléculas na superfície do sólido, a acomodação das moléculas adsorvidas, a formação e o crescimento dos flocos, bem como a quebra dos flocos. Assim, a maneira de dosar o polímero desempenha um papel crucial no desempenho do floculante. A fim de evitar uma sobredosagem em certas partículas, é recomendado adicionar à solução do floculante na forma mais diluída possível, enquanto se realiza uma agitação. Durante a adição do floculante, a agitação deve ser realizada de modo a minimizar o tempo necessário para alcançar uma completa homogeneização.

Figura 10 - Processo de dissolução completo de flocculante

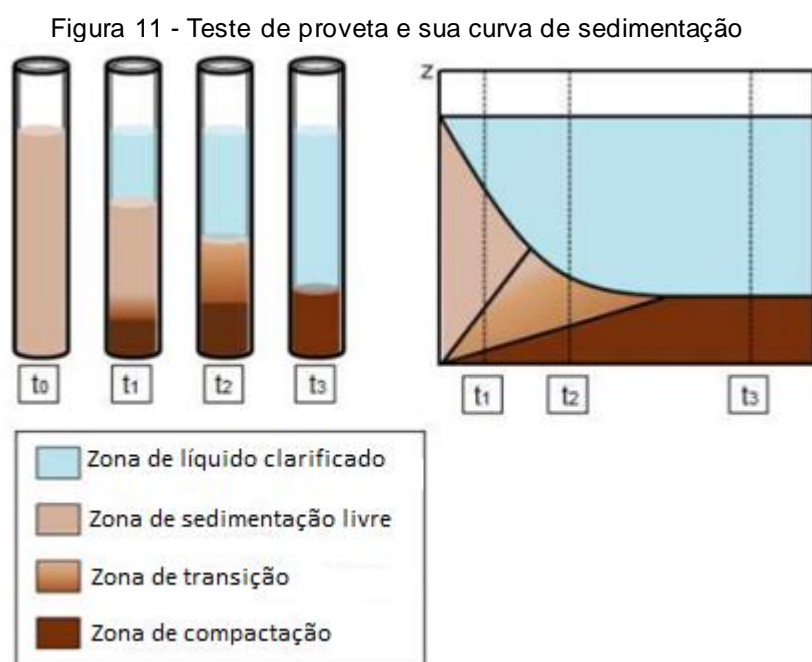


Fonte: (Arquivo interno da empresa,2022)

3. **Tamanho das Partículas:** existe uma relação significativa entre o tamanho das partículas e o peso molecular do agente flocculante. Cada tamanho de partícula requer um peso molecular mínimo, a partir do qual a floculação se torna possível. A dimensão das partículas também está associada à quantidade de agente flocculante necessário. Sistemas com partículas ultrafinas exigem uma concentração maior de agente flocculante devido à extensa área superficial a ser coberta pelas moléculas do polímero.
4. **Sistema Hidrodinâmico:** as colisões entre as partículas é um requisito essencial para que ocorra a agregação. A velocidade de floculação aumenta com o número de colisões. A agitação tem o efeito de estimular e reforçar as interações entre as partículas. Considerando que o número de interações aumenta com a intensificação da turbulência, aumentar a agitação auxilia a acelerar a velocidade de formação dos flocos. Porém, a partir de uma determinada velocidade crítica, característica de cada sistema, as forças de cisalhamento geradas pela agitação promovem a quebra do sistema de flocos formados. A facilidade com que ocorre a quebra aumenta significativamente com o tamanho do floco.

3.5 Ensaio de sedimentação

O processo da sedimentação descontínua auxilia na descrição do processo contínuo, com o uso do teste de proveta, que é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo, conforme ilustra a Figura 11 (MOREIRA, 2014). Os ensaios de sedimentação são realizados em provetas de 2.000 ml, que com o decorrer do tempo as partículas vão formando diferentes regiões: a região de líquido clarificado, a de sedimentação livre, a de transição e a de compactação.



Fonte: (MOREIRA, 2014)

No início da etapa de sedimentação, no instante ($t=0$), a suspensão é agitada, apresentando uma distribuição uniforme de partículas e uma concentração constante de sólidos em todos os pontos da proveta. Logo em seguida, as partículas maiores começam a sedimentar, formando uma fina camada de sólidos no fundo da proveta, conhecida como zona de compactação. Essa zona é composta por partículas mais pesadas, que sedimentam a uma velocidade maior.

As partículas menores sedimentam mais lentamente e sem interação entre si (apenas encontram resistência na fase líquida), resultando em uma zona intermediária, onde a concentração de sólidos permanece constante. Essa zona é chamada de zona de sedimentação livre. Conforme os sólidos se sedimentam, uma região de líquido clarificado, livre de sólidos, começa a se formar na parte superior da proveta (FRANÇA e MASSARANI, 2010).

Ao longo do teste, variações na altura das diferentes zonas são observadas. Entre a zona de sedimentação livre e a zona de compactação, temos a zona de transição entre as duas. As zonas de líquido clarificado e compactação se expandem à medida que a zona de sedimentação livre desaparece gradualmente. Em seguida, é alcançado um ponto em que existe apenas uma zona de sólidos (compactação) e uma zona de líquido clarificado (FRANÇA e MASSARANI, 2010).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Definição do problema

Atualmente em uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero, utiliza-se o polímero (floculante) poliacrilamida dosado de forma manual em um espessador de rejeito, com o objetivo de realizar o processo de sedimentação e recirculação de água no processo.

A solução é preparada dosando-se entre 10 a 15 kg de floculante em um tanque com 3600 litros de água a cada hora, a solução é direcionada por meio de tubulações até o espessador. Observou-se uma baixa eficiência operacional no processo, por dosagens inadequadas, comprometendo a eficiência do processo, gerando a recirculação da água com alta turbidez no circuito de beneficiamento, conforme a Figura 12 (a) mostra. As consequências da recirculação de água com alto percentual de sólidos no processo, incluem o aumento do consumo de água, pois a necessidade de acréscimo de água (nova) para condução do processo nas condições estabelecidas, aumento dos custos operacionais, entupimento dos jatos *spray* na separação magnética e entupimento dos bicos injetores de água usada para lavagem do minério nas peneiras.

Figura 12 - (a) espessador com alta turbidez, (b) processo manual de dosagem de floculante



Fonte: (Autor, 2023)

Diante disso, este trabalho visou solucionar esses problemas por meio da adequação de um sistema automático de dosagem de floculante em emulsão no espessador de rejeito. Esse sistema foi projetado para assegurar uma dosagem precisa e confiável do floculante, otimizando assim a eficiência do processo de sedimentação e recirculação de água.

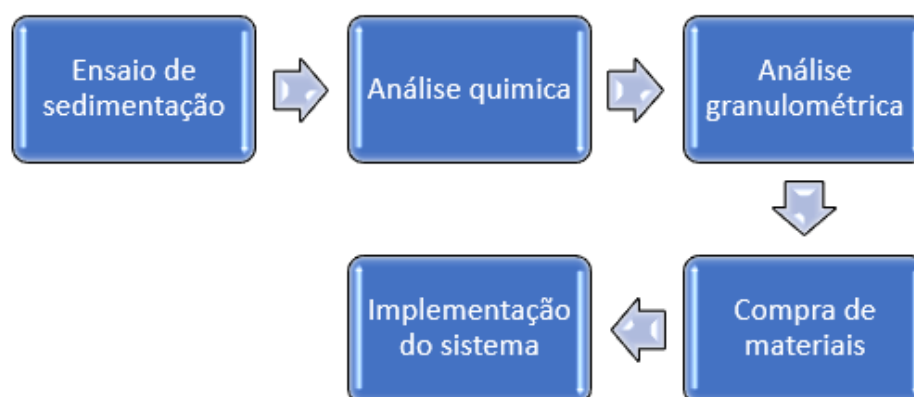
4.2 Metodologia

No presente trabalho, optou-se pela modalidade de execução de projeto, cujo objetivo foi a implementação de um sistema de dosagem automática de floculante. Os materiais necessários para essa adaptação foram:

- Uma válvula de PVC com diâmetro de 2,5 polegadas;
- 4 metros de mangueira de sucção com diâmetro de 2 polegadas;
- Reservatório com capacidade de 7000 litros;
- Bomba pneumática;
- Equipamento de preparação de polímero em emulsão, com os seguintes dados técnicos: potência (3 kW), tensão (220 V) e corrente (11 A).

O fluxograma abaixo (Figura 13) mostra as etapas que foram realizadas ao longo do projeto, para a implementação do sistema dosador de floculante automático.

Figura 13 - Etapas para implementação do sistema de dosagem de floculante automático



Os parâmetros iniciais do conjunto do equipamento dosador de floculante consistiram na vazão de 2000 a 3000 L/h na bomba que garante água no sistema dosador, sendo medida pelo instrumento rotâmetro que garantirá a vazão de água ideal para o sistema. As informações contidas na Tabela 3 foram informadas pelo fornecedor, apresentando a relação de frequência *versus* vazão da bomba dosadora que garante a dosagem ideal de floculante no sistema.

Tabela 3 - Relação de frequência x vazão de floculante

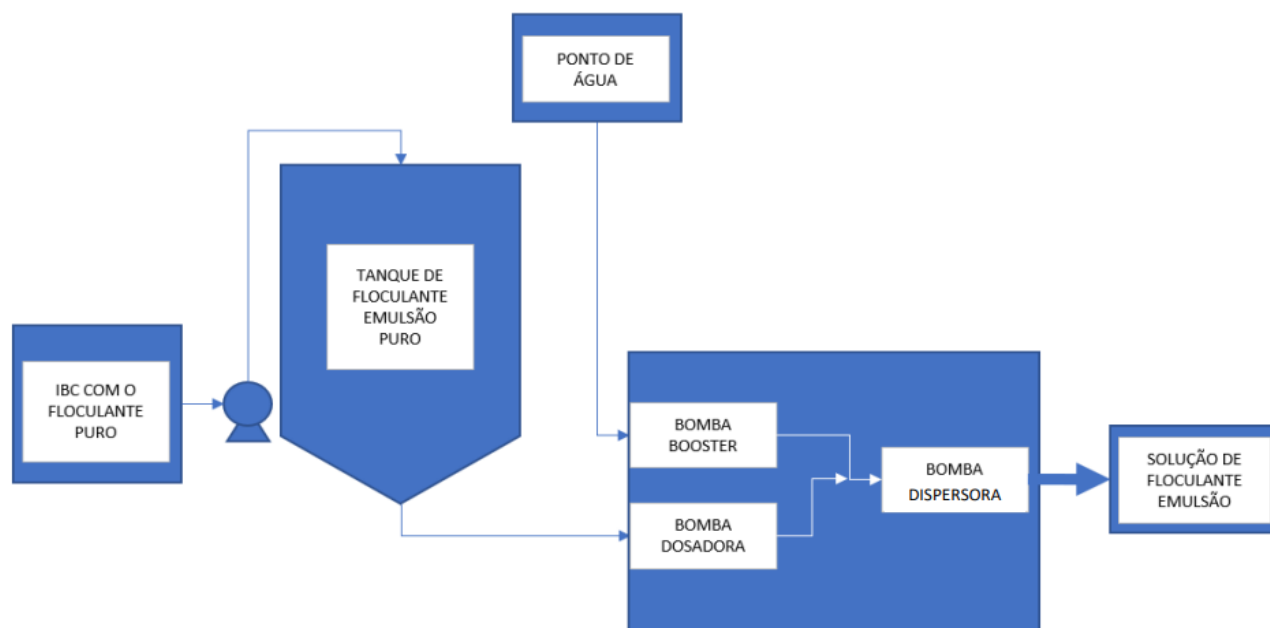
Frequência da bomba		Vazão de polímero	
12	HZ	9,4	L/h
15	HZ	13,3	L/h
20	HZ	19,4	L/h
25	HZ	25,4	L/h
30	HZ	31,5	L/h
35	HZ	37,5	L/h
40	HZ	43,5	L/h
45	HZ	49,6	L/h
50	HZ	55,6	L/h
55	HZ	61,6	L/h
60	HZ	68,8	L/h
65	HZ	73,7	L/h
70	HZ	79,7	L/h
75	HZ	85,8	L/h
80	HZ	91	L/h

Fonte: (Autor,2023)

4.3 Fluxograma do trabalho

De acordo com o fluxograma da Figura 14, a execução da adaptação do equipamento envolveu a transferência do floculante em emulsão do IBC (bombona), para um tanque de 10000 litros por meio de uma bomba pneumática. O floculante foi conduzido até a bomba dosadora (garante floculante no sistema), através de uma mangueira de 2,5 polegadas, por ação da gravidade. A água foi direcionada para a bomba dispersora por meio de um ponto de água com pressão de 7 kgf/cm². Essa água então foi transferida para a bomba dispersora usando uma bomba *booster* (garante água no sistema). Quando chegou na bomba dispersora, o floculante e a água foram misturados, formando uma solução que foi direcionada na tubulação do espessador de rejeito.

Figura 14 - Fluxograma de um sistema de dosagem de floculante automático



Fonte: (Arquivo interno da empresa, 2022)

4.4 Coleta de amostra

Seguindo a norma interna da empresa, foram coletados dois recipientes contendo, cada, 20 L de polpa da alimentação do espessador de rejeito, a fim de ter a melhor representatividade do todo, após ser coletadas foram identificadas.

Sendo 20 L de amostra para a realização de testes de sedimentação e 20 L para análise de caracterização granulometria e caracterização química, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Amostras coletadas



Fonte: (Autor,2023)

4.5 Análise granulométrica

Após coletada, a amostra de 20 L destinada ao processo de caracterização granulométrica, foi enviada para o laboratório. Foi realizado uma filtragem da amostra em um filtro prensa da marca FILTERPRESS, onde se obteve uma massa de 626 g de sólidos. A amostra, então, ficou por 10 minutos em chapas térmicas para realizar a secagem e em seguida passou por um Divisor Rifles (quarteador) da marca DIALMATICA, com a função de homogeneizar e dividir a amostra. Posteriormente, o material foi pesado, como resultado obteve se 340 g, sendo 40 g identificada e destinada para a análise química. 300 g do material passaram por um peneiramento a úmido nas malhas de 1mm – 0,50mm – 0,25mm – 0,106mm e 0,045mm. A Figura 16 mostra o processo e equipamentos utilizados na análise granulométrica.

Figura 16 - Equipamentos e processos utilizados na análise granulométrica. (a) filtro prensa, (b) processo de secagem da amostra, (c) amostra úmida na chapa térmica, (d) divisor rifles e (e) peneiramento a úmido



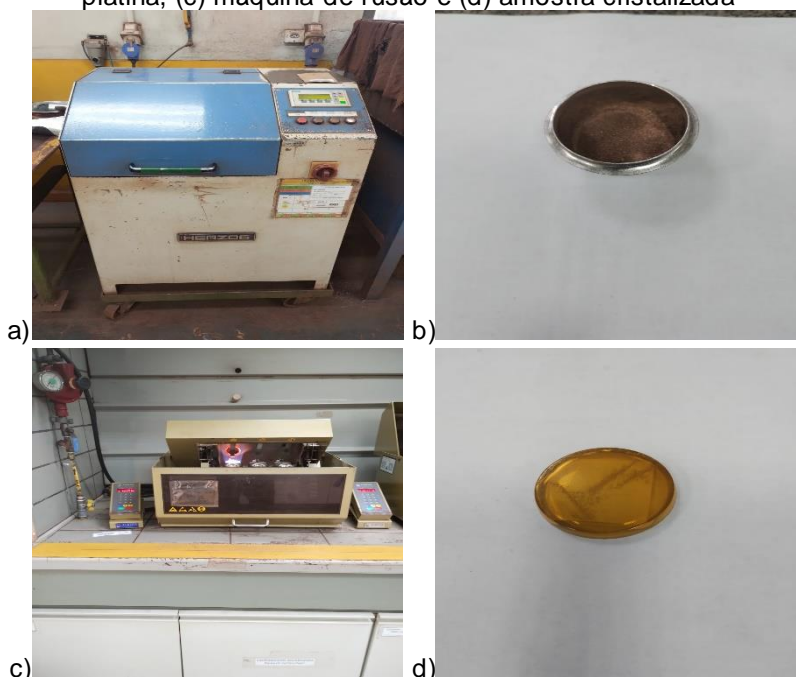
Fonte: (Autor, 2023)

4.6 Análise química

A amostra de 40 g destinada a análise química, dividida e homogeneizada no divisor rifles, foi processada, durante 4 min, em um moinho pulverizador com a finalidade de se obter partículas de tamanho inferior à 0,045 mm. Seguindo a norma técnica interna foram misturados, em um cadinho de platina, 5 g da amostra

pulverizada e 8g de tetraborato de sódio. A amostra após homogeneização foi fundida, em uma máquina de fusão, a 1200 °C por 15 min. A partir da fusão obteve uma amostra cristalizada e, essa, foi analisada em um espectrômetro de fluorescência de raio x da marca RIGOKU para a obtenção da análise química elementar do material. A Figura 17 mostra os equipamentos e materiais que foram utilizados na análise química conforme relatado.

Figura 17 - Equipamentos utilizados na análise química. (a) moinho pulverizador, (b) cadinho de platina, (c) máquina de fusão e (d) amostra cristalizada



Fonte: (Autor,2023)

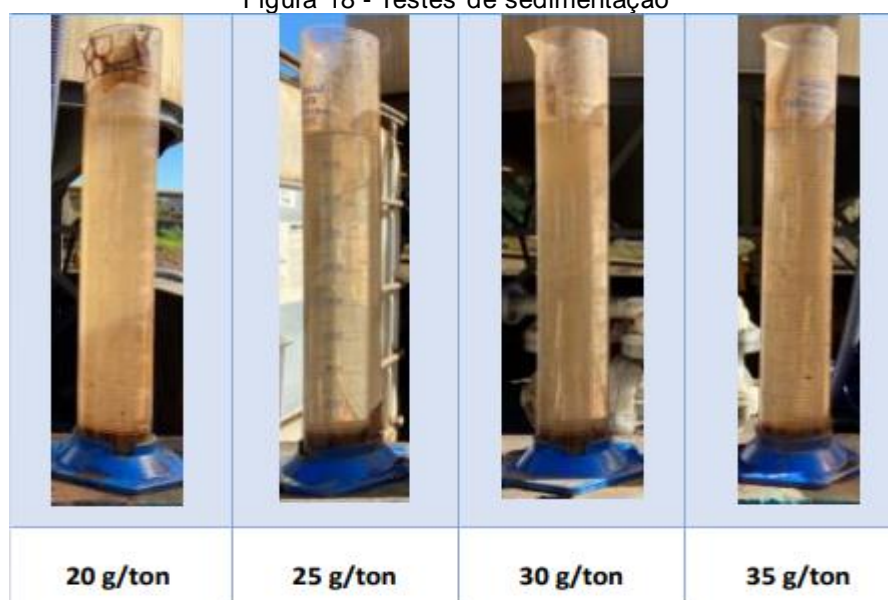
4.7 Testes de sedimentação

Foram utilizados os outros 20 L de amostras, coletadas da alimentação do espessador de rejeitos homogeneizada, para a realização dos testes de sedimentação. Então a amostra foi colocada em provetas de 1000 ml e logo em seguida foi agitada, utilizando um agitador manual, no mínimo por três vezes, colocando todos os sólidos em suspensão. A adição de floculante foi, então, realizada gradativamente durante três agitações consecutivas. Após a adição, agitou-se a polpa por mais três vezes e retirou-se o agitador manual da proveta, acionando em seguida o cronômetro e acompanhando o tempo de sedimentação dos sólidos na faixa da proveta de 950 a 750 ml.

Os parâmetros avaliados durante os testes incluíram a dosagem específica (g/ton), a velocidade de sedimentação (m/h), a compactação (g/L) e a turbidez (NTU), os quais foram utilizados para avaliar a eficácia das dosagens aplicadas, garantindo que a água recirculada pelo equipamento dosador tivesse uma turbidez inferior a 100 NTU em conformidade com a norma técnica local. O resultado da turbidez foi medido com um turbidímetro manual e os resultados da dosagem específica e compactação foram extraídos do ensaio de sedimentação realizados por uma empresa contratada.

De acordo com a Figura 18, o teste foi iniciado variando as dosagens do floculante em 20 g/t, 25 g/t, 30 g/t e 35 g/t nas provetas, com o objetivo de encontrar a melhor aplicação do produto para o espessador de rejeitos.

Figura 18 - Testes de sedimentação



Fonte: Autor, 2023.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante os testes de caracterização granulométrica, química e sedimentação das amostras para validação da adequação do equipamento dosador de floculante no espessador de rejeito.

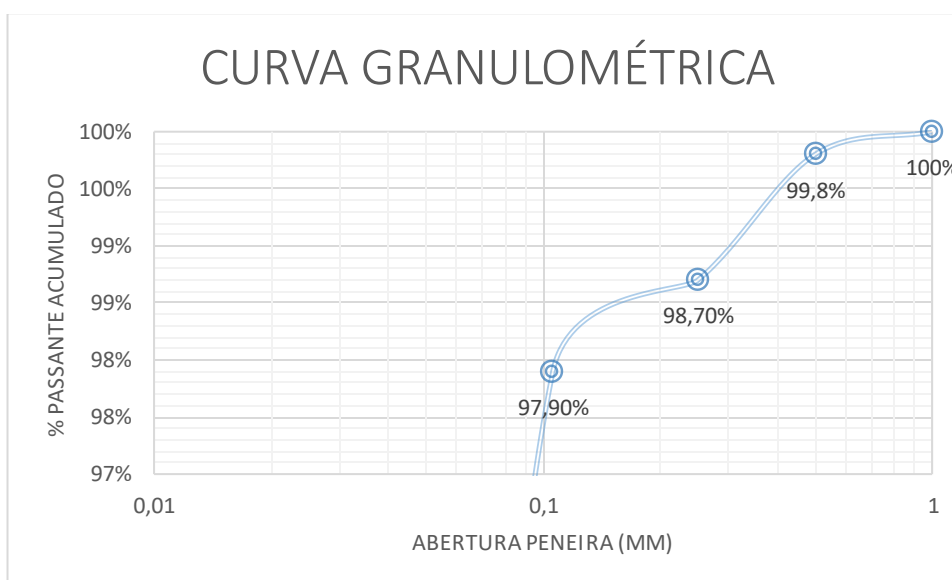
5.1 Análise granulométrica

A classificação granulométrica da amostra, foi realizado pelo peneiramento a úmido, onde foram utilizados cinco peneiras com malhas diferentes, sendo a maior malha 1 mm e a menor 0,045 mm. A Figura 19 mostra os resultados do percentual retido para cada malha que foi utilizada.

Com base nos resultados obtidos na análise granulométrica, observa – se que a amostra da polpa é constituída majoritariamente por partículas com granulometria menor que 0,045 mm, que são partículas muito finas.

Figura 19 - Resultado da análise e curva granulométrica.

Abertura peneira (mm)	% Retido simples	% Retido acumulado	% Passante acumulado
1	0	0	100%
0,5	0,2	0,2	99,8%
0,25	1,1	1,3	98,70%
0,106	0,8	2,1	97,90%
0,045	11,5	13,6	86,40%



Fonte: (Autor,2023)

5.2 Análise química

A análise química da amostra está apresentada na Tabela 4, resultados da análise destacaram um teor considerado elevado, pelos padrões internos da empresa, que considera o valor ideal de 24% de Fe na amostra de polpa de rejeito. Esse alto teor de Fe na amostra é provavelmente resultado predominante das partículas finas (< 0,045 mm), provenientes do processo de flotação. Tais partículas reagiram com as

espécies coletoras e depressoras do sistema de flotação, resultando na coleta das partículas finas de Fe e direcionando-as para o espessador de rejeitos.

Tabela 4 - Resultado da análise química

% Fe	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% P	% Mn	% CaO	% MgO	% TiO ₂
31,23	47,67	4,2	0,060	0,805	0,021	0,122	0,130

Fonte: (Autor,2023)

5.3 Testes de sedimentação

O teste de sedimentação foi iniciado variando as dosagens do floculante em emulsão, a fim de encontrar a melhor aplicação de produto para o espessador. Os dados técnicos que foram considerados para a realização dos testes de sedimentação estão representados na Tabela 5.

O percentual de sólidos foi encontrado de acordo com a seguinte expressão da Equação 1:

$$(S\%) = \frac{100 \times ds \times (dp - 1,0)}{dp \times (ds - 1,0)} \quad (1)$$

(S%) = percentual de sólidos

ds = massa específica de sólidos

dp = massa específica da polpa

Tabela 5 - Dados técnicos

Polpa de rejeito	Dados
% de sólidos	9,6%
Peso específico de sólidos (g/cm ³)	3,45
Densidade da polpa (g/cm ³)	1,073

Fonte: (Arquivo interno da empresa,2023)

As equações para o cálculo de velocidade de sedimentação e compactação da amostra no teste de provetas, não foi fornecido pelo fornecedor, por ser um método exclusivo da empresa e possuir a base de cálculos patenteada.

A Tabela 6 e as Figuras 19, 20 e 21 abaixo mostram os resultados obtidos nos testes.

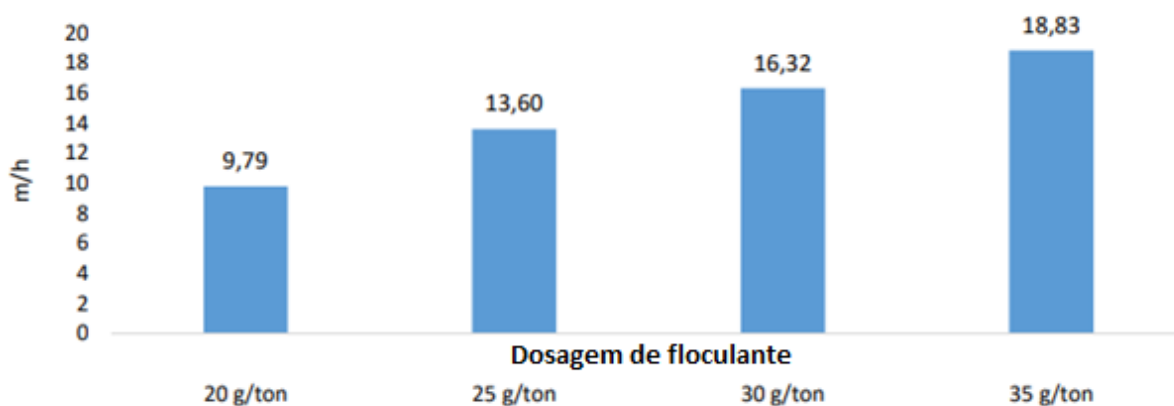
Tabela 6 - Resultados de teste de sedimentação

Floculante (g/ton)	Velocidade de sedimentação (m/h)	Compactação (g/L)	Turbidez (NTU)
Teste 1 - 20 g/ton	9,79	822	104,0

Teste 2 - 25 g/ton	13,60	835	54,6
Teste 3 - 30 g/ton	16,32	818	73,3
Teste 4 - 35 g/ton	18,83	817	97,2

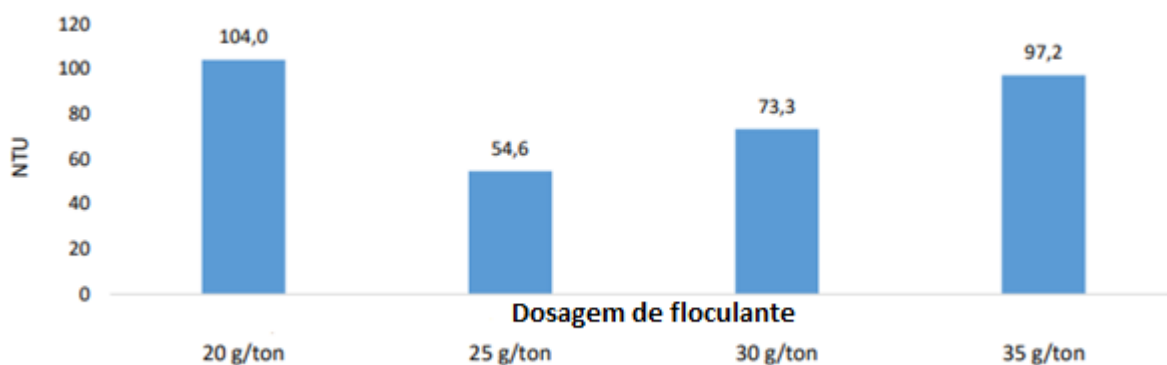
Fonte: (Arquivo interno da empresa,2023)

Figura 20 - Velocidade de sedimentação das amostras com diferentes dosagens de floculantes



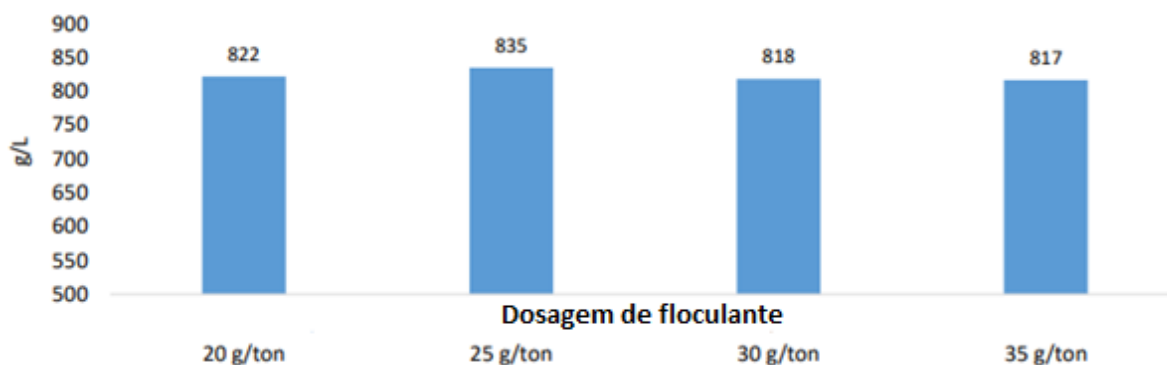
Fonte: (Arquivo interno da empresa,2023)

Figura 21 - Resultado de Turbidez para as amostras



Fonte: (Arquivo interno da empresa,2023)

Figura 22 - Resultado de compactação de sólidos por litro de polpa



Fonte: (Arquivo interno da empresa,2023)

Os resultados demonstraram que as melhores dosagens de floculante variaram entre 25 e 30 g/ton. A dosagem de 25 g/ton foi considerada a ideal para as condições atuais, pois alcançou o melhor resultado do teste, tendo a menor turbidez e maior zona de compactação em comparação com as outras dosagens.

Observa - se que saindo da dosagem de 25 g /ton para 30 g /ton a velocidade de sedimentação aumentou 20%, porém a turbidez da dosagem de 30 g/ton alcançou um resultado bem inferior ao esperado, pois uma velocidade de sedimentação muito alta pode resultar em uma eficiência reduzida do floculante, pois partículas finas podem não ter tempo suficiente para se aglomerar adequadamente.

Para dosagem de floculante no equipamento dosador é importante resaltar que a mesma está relacionada à taxa de alimentação do espessador (t/h).

A taxa de alimentação indica a dosagem em litros do floculante no espessador, sendo assim, todo o cálculo de dosagem leva em consideração a taxa. A fórmula abaixo (equação 2) foi utilizada para calcular a quantidade de litros por hora que o equipamento dosador dosou no espessador, levando em conta uma alimentação de 366 toneladas por hora.

$$\text{Litros de floculante} = \frac{\text{Dosagem} \left(\frac{g}{t}\right) \times \text{Taxa de alimentação}}{100 \times \text{Densidade } 1 \left(\frac{L}{Kg}\right)}$$

(2)

A diluição do floculante foi encontrado de acordo com a equação 3:

$$\% \text{ Diluição} = \left(\frac{\text{Quantidade de floculante}}{\text{Quantidade de água}} \right) \times 100 \quad (3)$$

De acordo com a Tabela 7, foram registradas as dosagens e diluições pré e pós-implantação do equipamento. A Figura 23 mostra a variação na qualidade da água proveniente do overflow do espessador de rejeitos antes e depois da implementação do equipamento. Vale ressaltar que a utilização do equipamento resultou em ganhos significativos em disciplina operacional nas dosagens, refletindo positivamente nos resultados obtidos.

Tabela 7 - Comparação de dosagem e diluição antes e depois da implementação do equipamento .

	Floculante em pó	Floculante emulsão
	Antes	Depois
Dosagem	35 g/t	25 g/t
Diluição	0,35%	0,47%

Fonte: (Autor,2023)

Figura 23 - (a) overflow antes da implementação do equipamento, (b) e (c) coleta do overflow depois da implementação do espessador de rejeito



(a) Fonte: (Autor,2023)

5. CONCLUSÃO

Com base nos testes que foram realizados para validar o sistema do equipamento dosador foi possível chegar as seguintes conclusões:

- A melhor dosagem de floculante encontrada para o cenário atual do espessador de rejeito é 25 g/ton. Tal dosagem apresentou excelentes resultados na clarificação da água, na velocidade de sedimentação e na compactação. A polpa testada apresentou sedimentação satisfatória não havendo dificuldade no processo de separação sólido-líquido.
- A análise granulométrica e química da amostra do espessador de rejeito, revelou principalmente a presença de partículas finas e um teor considerado elevado de Fe na amostra.
- A execução da adequação do sistema automático de dosagem de floculante no espessador mostrou ser viável a partir dos testes realizados, onde o mesmo atualmente encontra se em funcionamento, operando com dosagem de 9,4 L/h de floculante, a partir da frequência de 12 HZ da bomba dosadora do equipamento e uma diluição de 0,47% aproximadamente.
- A adequação do equipamento proporcionou resultados significativos para o processo de beneficiamento, tais como: eficiência operacional, garantia de recirculação de água não contaminada no circuito, e uma redução de custos operacionais de aproximadamente R\$ 82 mil por mês em comparação com o floculante em pó anteriormente utilizado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Arquivo interno da mineradora do Quadrilátero Ferrífero
- 2 - BALTAR, A. M. **PROCESSOS DE AGREGAÇÃO**. In: **CETEM TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. 5ª edição. Rio de Janeiro: [S.N.], 2010, cap. 13, p. 563-571.
- 3 - CARVALHO, P. S. L. D. ET AL. **MINÉRIO DE FERRO**. BNDES BIBLIOTECA DIGITAL. DISPONIVEL em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4802/1/BS%2039%20min%c3%a9rio%20de%20ferro_P.pdf,2014>. acesso em: 11 junho 2023.
- 4 - CAXITO, F.; DIAS, G. **FERRO. RECURSOS MINERAIS DE MINAS GERAIS**. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/#o-quadril%C3%A1tero-ferr%C3%ADfero,2018>>. Acesso em 13 junho 2023.
- 5 - CHAVES, A. P. et al. In: _____ **TEORIA E PRÁTICA DO TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. 2ª edição. São Paulo: [s.n.], v. II, 2004. Cap. 2, p. 54.
- 6 - CORREIA, C. G. **CLASSIFICAÇÃO E PENEIRAMENTO**. In: **CETEM TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. 5ª edição. Rio de Janeiro: [S.N.], 2010, cap. 6, p. 257-266.
- 7 - DE LARA, A. F. M. **ESPESSAMENTO E TRANSPORTE DE PASTA MINERAL**. UFMG, 17 fevereiro 2011, p. 12-13
- 8 - FIGUEIRA, V. O.; LUZ, B. D.; ALMEIDA, L. M. D. **BRITAGEM E MOAGEM**. IN: **CETEM TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. 5ª edição. Rio de Janeiro: [S.N.], 2010 cap. 4, p. 143-145.
- 9 - FRANÇA, C. A.; MASSARANI, **SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO**. IN: **CETEM TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. 5ª edição. Rio de Janeiro [S.N.], 2010, cap. 15, p. 637-660.
- 10 - **FRANÇA, C. A.; MASSARANI, SEPARAÇÃO SOLIDO E LÍQUIDO**. IN: _____ **TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. 6ª edição. [S.L.]: [S.N.], 2018, cap. 14.
- 11 - GUIMARÃES, F. A. V. **REVISÃO NOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADORES E COMPARAÇÃO DOS MODELOS INDUSTRIAIS**, Belo Horizonte, 17 setembro 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8R9M24>>, acesso em: 30 maio 2023.
- 12 - IBRAM, 2022. DISPONIVEL EM: <<https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investimentos-para-us-50-bi-ate-2027>>, acesso em: 07 abril 2023.
- 13 - LOPES, M. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO DE ITATIAIUÇU- MG**, Araxá, 09 maio de 2017.

14 - LUZ, A. B. D. B.; LINS, F. A. F. **INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. IN: CETEM TRATAMENTO DE MINÉRIOS. 5ª edição, Rio de Janeiro. [S.N.], 2010, cap. 1, p. 1-20.

15 - MC CORMICK, L. **STRUCTURAL DESIGN OF WATER - SOLUBLE COPOLYMERS**, 1991.

16 - MOREIRA, A. **ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO EM SUSPENSÕES DE FLUIDOS COM CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS PSEUDOPLÁSTICAS**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014, p. 23.

17 - ROBERTO, B. **INFLUÊNCIA DOS DIVERSOS TIPOS LITOLÓGICOS NAS OPERAÇÕES DE CONCENTRAÇÃO DA INSTALAÇÃO DE BENEFICIAMENTO DE BRUCUTU**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, março 2010, p. 30-31.

18 - RODRIGUES, C. O. **MECANISMOS DE FLOCULAÇÃO COM POLÍMEROS HIDROSSOLÚVEIS, GERAÇÃO DE FLOCOS AERADOS, FLOCULAÇÃO EM NÚCLEOS DE BOLHAS FLOCULANTES E APLICAÇÕES NA SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS MODELOS POR FLOTAÇÃO**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dezembro 2010.

19 - USGS. **IRON ORE IN DECEMBER 2022**. MINERAL INDUSTRY SURVEYS, Abril 2023, p. 1-8.