

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

MARIA EDUARDA SOUZA DUARTE

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REAGENTES COMBINADOS NA SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS FINAS DE MINÉRIO FOSFÁTICO

ARAXÁ-MG
2026

MARIA EDUARDA SOUZA DUARTE

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REAGENTES COMBINADOS NA SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS FINAS DE MINÉRIO FOSFÁTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Profª Drª. Michelly dos Santos Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Natal Junio Pires

ARAXÁ-MG

2026

Duarte, Maria Eduarda Souza.
D812a Avaliação do desempenho de reagentes combinados na sedimentação de partículas finas de minério fostático / Maria Eduarda Souza Duarte. – 2026.
81 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. Natal Junio Pires.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. *Campus* Araxá. Engenharia de Minas, Departamento de Minas e Construção Civil, Araxá, 2026.
Bibliografia.

1. Beneficiamento de minério. 2. Separação sólido-líquido. 3. Floculação. 4. Fosfatos. I. Oliveira, Michelly dos Santos. II. Pires, Natal Junio. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.7

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Márcia Martins da Silva CRB-6/2578

MARIA EDUARDA SOUZA DUARTE

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE REAGENTES COMBINADOS NA SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS FINAS DE MINÉRIO FOSFÁTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 18 de Junho de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br
MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA
Data: 03/07/2026 15:23:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Orientador(a): Profª Drª. Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Documento assinado digitalmente
gov.br
NATAL JUNIO PIRES
Data: 04/07/2026 12:25:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Presidente e Coorientador: Prof. Dr. Natal Junio Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Documento assinado digitalmente
gov.br
ANTONIO LENITO SOARES JUNIOR
Data: 05/07/2026 14:17:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Membro Titular: Prof. Dr. Antônio Lenito Soares Júnior
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Documento assinado digitalmente
gov.br
SANTIAGO HENRIQUE CRUZ
Data: 06/07/2026 00:32:05-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Membro Titular: Mestre Santiago Henrique Cruz

Dedico este trabalho a minha mãe, Alessandra, que sempre fez acreditar na realização dos meus sonhos e me apoia para que eu os fizesse acontecer. Aos meu primos Vinicius e Gabriel, por me incentivar ao longo da jornada. E meu irmão, Marlon, junto com minha família, peças essenciais para esta conquista. A eles todo o meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, por me conceder a oportunidade da realização de mais um sonho. Por ser a minha base e o meu suporte, e por me proporcionar saúde e sabedoria para concluir essa etapa tão importante.

A minha orientadora, Profª**.** Drª**.** Michelly dos Santos Oliveira, por todo apoio, atenção e disponibilidade. Pelas contribuições e ensinamentos compartilhados em toda a minha trajetória acadêmica, e por acreditar e me guiar na realização desse trabalho.

A minha família, por todo amor e incentivo, ao meu irmão, Marlon, a minha avô Conceição e aos meus tios, Graciene e Carlos, que sempre estiveram ao meu lado durante a caminhada. De uma forma especial, agradeço a minha mãe, Alessandra, que sempre acreditou nos meus sonhos e fez de tudo para que eu pudesse realizá-los. Essa conquista é nossa! Te amo incondicionalmente.

Aos professores, por todos os conhecimentos repassados ao longo do curso, e por despertarem em mim, a certeza e o amor pela Engenharia de Minas. Agradeço, em especial, aos professores, Michelly, Natal Pires, Alexandre Morais e Antônio Lenito, aos quais tenho profunda admiração, vocês são verdadeiros exemplos, que com certeza irei levar para sempre em minha trajetória.

Por fim, agradeço aos meus amigos do curso Izabela Cristina, Elizabeth Mensah e Jordane por toda cumplicidade e superação de desafios, e em especial a minha grande amiga, Elizabeth, pelo companheirismo, apoio e amizade.

Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.

PROVÉRBIOS 16:3

RESUMO

O aumento das atividades de mineração e a crescente demanda por maior eficiência nos processos de separação sólido-líquido tornam indispensável o aprimoramento das técnicas de espessamento aplicadas aos rejeitos fosfáticos finos. Nesse contexto, a etapa de sedimentação desempenha papel fundamental na recuperação de água de processo e na redução do volume de rejeitos destinados à disposição final, contribuindo diretamente para a sustentabilidade e a viabilidade operacional das plantas de beneficiamento. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho dos floculantes Magnafloc 351(Floculante não iônico), Flonex 953 (Floculante aniônico) e Nalkat 7607/Nalco(Cloreto de amina poliquaternária), aplicados tanto de forma individual quanto em combinação com amido de mandioca, visando identificar a condição capaz de proporcionar maior velocidade de sedimentação e melhor clarificação do sobrenadante. Os ensaios foram realizados por meio de testes de sedimentação de proveta, nos quais foram variadas as dosagens e combinações dos reagentes e o pH da polpa, buscando compreender a influência desses parâmetros na sedimentação das partículas finas de minério fosfático. Com base nos resultados experimentais, verificou-se que o pH tem forte influencia na clarificação e velocidade de sedimentação. Entre os reagentes avaliados individualmente, o Flonex 953 destacou-se por proporcionar as maiores velocidades de sedimentação e proporcionar uma água menos turva. Além disso, observou-se que a solução ótima encontrada pelo Minitab correspondeu à composição contendo 50% de Magnafloc e 50% de Flonex, sem adição de Nalkat e amido de mandioca. Esse resultado evidencia um efeito de sinergia entre os dois floculantes, permitindo simultaneamente a redução da turbidez do sobrenadante e o aumento da velocidade de sedimentação.

PALAVRAS-CHAVE: Espessamento; Sedimentação; Reagentes; Minério fosfático; Finos.

ABSTRACT

The increase in mining activities and the growing demand for greater efficiency in solid-liquid separation processes have made it essential to improve thickening techniques applied to fine phosphate tailings. In this context, sedimentation plays a fundamental role in process water recovery and in reducing the volume of tailings destined for final disposal, thereby contributing directly to the sustainability and operational feasibility of mineral processing plants.The present study aimed to evaluate the performance of the flocculants Magnafloc 351, Flonex 953, and Nalkat 7607/Nalco, applied both individually and in combination with cassava starch, in order to identify the condition capable of providing the highest sedimentation rate and the best supernatant clarification. Sedimentation tests were carried out using graduated cylinders, in which reagent dosages, reagent combinations, and pulp pH were varied to investigate the influence of these parameters on the sedimentation behavior of fine phosphate ore particles.Based on the experimental results, it was verified that pH has a significant influence on both supernatant clarification and sedimentation rate. Among the flocculants evaluated individually, Flonex 953 exhibited the best performance, providing the highest sedimentation rates and the lowest turbidity values in the clarified water. Furthermore, the optimization performed using Minitab indicated that the optimum formulation consisted of a mixture containing 50% Magnafloc and 50% Flonex, without the addition of Nalkat or cassava starch. This result demonstrates a synergistic effect between the two flocculants, simultaneously reducing the turbidity of the supernatant and increasing the sedimentation rate.

Keywords: Thickening; Sedimentation; Reagents; Fine Particles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Técnicas de separação sólido-líquido em função do tamanho de partícula ou microorganismo.....20

Figura 2 - Coagulação e floculação no processo de agregação e sedimentação das partículas.....23

Figura 3 – Diagrama que representa uma partícula coloidal.....26

Figura 4 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.....27

Figura 5 - Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.....27

Figura 6 – Mecanismo simplificado de Coagulação. 29

Figura 7 – Nalkat 7607/Nalco -Coagulante.....31

Figura 8 – Mecanismo de floculação por pontes.....34

Figura 9 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.....34

Figura 10 – Flonex 959 -Floculante Aniônico.....36

Figura 11- Estrutura química da amilose.....37

Figura 12- Estrutura química da amilopectina.....38

Figura 13– Poço de alimentação com suas entradas tangenciais e defletores internos.....41

Figura 14 – Curva de variação do torque e medidas de segurança tomadas e circuito eletrônico para a operação dos rakes.....42

Figura 15 – Vista lateral de um espessador convencional..... 43

Figura 16-Fluxograma da metodologia utilizada.....46

Figura 17- Densímetro a gás.....47

Figura 18- pHmetro (HANNA-Edge).....50

Figura 19-Teste com a demonstração do homogeneizador de proveta.....51

Figura 20- Turbidimetro.....56

Figura 21- Rejeito fosfático fino (Overflow da deslamagem)..... 58

Figura 22- Resultados da distribuição granulométrica.. 59
Figura 23-Resultado do teste(19).....60
Figura 24- Resultado do teste com maior desempenho(19).....73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Massas das combinações dos reagentes em proporções.....53
Quadro 2-Resultado da densidade do rejeito fosfático.....60
Quadro 3-Velocidade de sedimentação das partículas no teste de pH natural e sem reagentes.....61
Quadro 4-Velocidade de sedimentação das partículas do teste de concentração de 10g/t.....62
Quadro 5-Velocidade de sedimentação das partículas do teste de concentração de 30g/t.....64
Quadro 6-Velocidade de sedimentação das partículas do teste de concentração de 50g/t.....65
Quadro 7-Turbidez do clarificado nas condições variadas de concentração de reagentes.....66
Quadro 8-Velocidades de sedimentação Magnafloc- Variando o pH.....67
Quadro 9- Velocidades de sedimentação Flonex-Variando PH.....68
Quadro 10- Velocidades de sedimentação Nalkat-Variando pH.....69
Quadro 11- Turbidez- Variando pH.....70
Quadro 12- Resultados da sedimentação com reagentes combinados.....70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-Curva de sedimentação (pH natural-SEM reagentes) 61
Gráfico 2 -Curva de sedimentação com concentração de 10g/t 62
Gráfico 3-Curva de sedimentação com concentração de 30g/t.....63
Gráfico 4-Curva de sedimentação com concentração de 50g/t.....65
Gráfico 5-Curva de sedimentação Magnafloc-Variando pH.....67
Gráfico 6-Curva de sedimentação Flonex-Variando pH.....68
Gráfico 7-Curva de sedimentação Nalkat-Variando pH.....69
Gráfico 8- Resultado da curva de sedimentação com reagentes combinados.....74
Gráfico 9- Curva de sedimentação com reagentes combinados mais eficientes.....75
Gráfico 10- Gráfico de superfície de mistura de NTU.....76
Gráfico 11-Gráfico de contorno da mistura para a resposta turbidez (NTU).....77
Gráfico 12-Gráfico de contorno da mistura para a resposta de velocidade(m/h).....78
Gráfico 13-Gráfico de superfície de mistura de velocidade(m/h).....79
Gráfico 14-Gráfico de contorno de NTU e velocidade(m/h).....80

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

1.1 Objetivo 16

1.2 Objetivo Específicos 17

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

2.1. Rejeito Fosfático 18

2.2. Separação Sólido-Líquido 19

2.3. Sedimentação 20

2.4 Mecanismos de Agregação 22

2.4.1 Dupla camada elétrica (DCE) 23

2.4.2 Teoria DLVO 26

2.4.3 Coagulação 27

2.4.3.1 Coagulantes 28

2.4.4 Floculação 30

2.4.4.1 Mecanismos de Floculação 31

2.4.4.2 Floculantes 32

2.4.4.3 Amido de fécula de mandioca 34

2.5 Moduladores de pH 36

2.6 Espessamento 37

3. METODOLOGIA 42

3.1 Preparação da amostra 43

3.2 Caracterização da amostra 43

3.3 Preparação dos reagentes 44

3.4 Teste de sedimentação 46

3.4.1 Preparação da polpa 46

3.4.2 pH Natural 47

3.4.3 Variando pH 48

3.4.4 Reagentes combinados 48

3.5 Tratamento e Análise dos Dados 50

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 53

4.1 Caracterização do rejeito 53

4.2 Teste de proveta com pH natural- Sem reagentes 55

4.3 Teste de proveta com pH natural - Variando concentrações de reagentes 55

4.4 Variando pH- Concentração de 30g/t de reagentes 60

4.4.1 Magnafloc 60

4.4.2 Flonex 61

4.4.3 Nalkat 62

4.5 Combinação dos reagentes 63

5. CONCLUSÃO 72

6. REFERÊNCIAS 75

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010, os rejeitos são definidos como:

> resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis [...], não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Dessa maneira, os rejeitos encontram-se constantemente presentes nas atividades mineiras, manifestando-se, ao final do processo de beneficiamento, majoritariamente na forma de polpa (CONCHA, 2014). Embora a mineração seja uma das atividades de maior relevância econômica no Brasil, a geração de grandes volumes de rejeitos representa um dos principais desafios tecnológicos e ambientais do setor. Quando não adequadamente tratados, esses materiais podem comprometer a eficiência operacional, elevar os custos do processo e aumentar significativamente os riscos ambientais (BRAGA, 2021).

Entre esses rejeitos, destacam-se os provenientes do *overflow* da etapa de deslamagem, que apresentam granulometria fina e comportamento coloidal estável, dificultando sua sedimentação natural. Esses materiais são constituídos predominantemente por partículas argilosas ultrafinas, que permanecem em suspensão por longos períodos devido à sua elevada área superficial e às interações eletrostáticas entre as partículas (Olcay, et al,2020). Em razão da elevada fração de ultrafinos e da baixa taxa de sedimentação natural, esses rejeitos são usualmente submetidos a processos de espessamento visando aumentar a concentração de sólidos da polpa, recuperar água clarificada para recirculação no processo e viabilizar rotas de disposição com menor volume e maior estabilidade, como filtração e disposição de rejeitos espessados ou empilhamento drenado (TAO et al., 2010).

Os reagentes Magnafloc 351, Flonex 953, Nalkat 7607/Nalco e Amido de mandioca são amplamente utilizados nos processos de separação sólido-líquido em plantas de beneficiamento mineral. O Magnafloc 351 (poliacrilamida não-iônica), o Flonex 953 (poliacrilamida aniônica) e a fécula de mandioca atuam como floculantes, induzindo a formação de agregados maiores e mais densos, o que favorece o adensamento da polpa e aumenta a eficiência da clarificação e da recuperação de água (MARTINS; OLIVEIRA; TESTA, 2024). Já o Nalkat 7607/Nalco, constituído por

cloreto de amina poliquaternária, atua como coagulante, neutralizando cargas superficiais das partículas ultra-finas, reduzindo a repulsão eletrostática entre elas e facilitando a ação subsequente dos floculantes.

Assim, a combinação controlada de coagulantes e floculantes numa condição ideal representa uma estratégia crucial para o tratamento do rejeito fino do *overflow* da deslamagem, permitindo que o espessamento seja mais eficiente e que o rejeito seja encaminhado às barragens com menor umidade ou até mesmo direcionado para rotas de disposição mais sustentáveis, como empilhamento drenado ou recirculação parcial. Dessa forma, o aprimoramento da etapa de espessamento configura-se como um ponto-chave para a melhoria do desempenho global do beneficiamento mineral e para a mitigação dos impactos ambientais da mineração de fosfato no país (MARTINS; OLIVEIRA; TESTA, 2024).

Diante desse contexto, os rejeitos finos provenientes do overflow da etapa de deslamagem apresentam elevada estabilidade coloidal e granulometria extremamente reduzida, características que dificultam significativamente seu aproveitamento e, sobretudo, a intensificação dos processos de sedimentação (TAO; PAREKH; HONAKER, 2008;). Essa condição impõe desafios operacionais relevantes, uma vez que a baixa velocidade de decantação compromete a eficiência das etapas subsequentes de separação sólido-líquido, exigindo a adoção de estratégias específicas, como o uso de reagentes e o controle rigoroso das variáveis operacionais, para viabilizar o manejo adequado desses materiais (FAWELL, 2017; TAO et al., 2010). Nesse sentido, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos voltados à otimização desses parâmetros, visando aumentar a eficiência operacional e reduzir os impactos ambientais associados ao tratamento de rejeitos minerais.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de reagentes combinados na sedimentação de partículas finas de minério fosfático.

1.2 Objetivo Específicos

- Avaliar o desempenho individual dos reagentes Magnafloc 351, Flonex 953, Nalkat 7607/Nalco mantendo constantes o pH natural, a porcentagem de sólidos e a dosagem.
- Investigar a influência do pH (ácido e básico) e da concentração dos reagentes no processo de sedimentação.
- Avaliar a utilização da mistura de reagentes com a fécula de mandioca no desempenho da sedimentação por meio de planejamento experimental de misturas.
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios com aplicação individual e combinada dos reagentes, sob diferentes condições de pH, visando à identificação da condição global ótima que maximize a eficiência do processo de sedimentação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem como intuito dissertar conceitos e técnicas fundamentais abordadas na realização desse trabalho.

2.1. Rejeito Fosfático

Os rejeitos gerados na mineração concentram-se principalmente nas etapas de flotação e deslamagem, sendo cada uma responsável por aproximadamente 34% do volume total produzido (GUIMARÃES et al., 2011). No beneficiamento de minérios fosfáticos, destaca-se o rejeito proveniente do overflow da deslamagem, constituído predominantemente por partículas ultrafinas que permanecem dispersas em meio aquoso. Esse material é posteriormente encaminhado aos espessadores, onde ocorre a separação entre as fases sólida e líquida.

Devido à sua composição granulométrica extremamente fina, esses rejeitos apresentam elevada área superficial específica, favorecendo a interação entre as partículas e a água. Como consequência, desenvolvem-se forças de superfície capazes de manter as partículas dispersas por longos períodos, conferindo ao sistema elevada estabilidade coloidal. Segundo Tão et al. (2008) e Qi et al. (2011), a lama gerada na deslamagem de minérios fosfáticos caracteriza-se por esse comportamento, formando suspensões altamente estáveis em meio aquoso.

A elevada estabilidade coloidal compromete diretamente os processos de sedimentação e espessamento. A reduzida velocidade de decantação das partículas dificulta sua separação da fase líquida, resultando em baixa eficiência dos espessadores e elevada retenção de água nos rejeitos. Dessa forma, operações de adensamento e clarificação tornam-se mais complexas, exigindo maior controle operacional e, frequentemente, o emprego de reagentes auxiliares para otimizar o processo (SILVA; LUZ, 2010).

Além das dificuldades associadas à sedimentação, esses materiais podem apresentar comportamento reológico complexo em concentrações mais elevadas de sólidos. A formação de estruturas internas na suspensão aumenta a resistência ao escoamento e dificulta o adensamento da polpa, afetando o transporte, o bombeamento e a disposição dos rejeitos (MARTINS,2017).

Sob a perspectiva ambiental e operacional, o gerenciamento adequado desses rejeitos constitui um dos principais desafios da mineração contemporânea. A elevada retenção de água impacta a eficiência da recirculação hídrica e aumenta os custos operacionais, enquanto sua disposição pode representar riscos relacionados à estabilidade geotécnica de estruturas de contenção. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias e estratégias mais eficientes para o tratamento, adensamento e disposição de rejeitos finos torna-se fundamental para promover maior segurança operacional e sustentabilidade nas atividades minerárias (KOSSOFF et al., 2014).

2.2. Separação Sólido-Líquido

Com o contínuo avanço do setor mineral, torna-se indispensável a recuperação e recirculação da água utilizada no processamento de minérios. A etapa de espessamento constitui operações essenciais nos processos de separação sólido-líquido na indústria mineral, sendo há muito tempo reconhecidas como alternativas viáveis para o desaguamento de rejeitos (AMARANTE *et al.*, 2002).

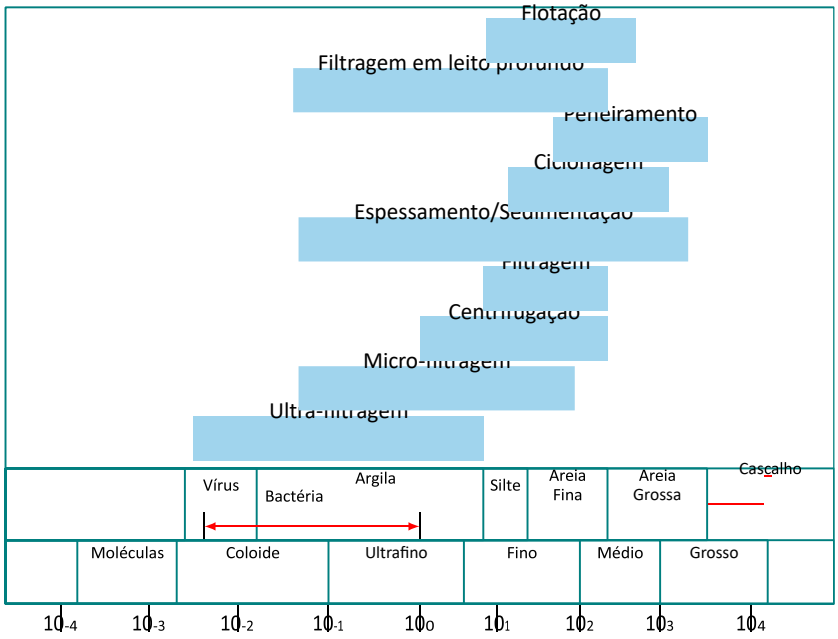
Diversas operações presentes na indústria mineral são fundamentais em um fluxograma de beneficiamento, destacando-se não apenas pela complexidade dos processos de separação, mas também pelos elevados custos de investimento e manutenção envolvidos. Entre essas operações, a separação sólido-líquido desempenha papel fundamental no processamento mineral (FRANÇA; MASSARANI, 2018), pois possibilita a recuperação e a recirculação da água de processo, contribuindo para a redução do consumo hídrico, dos custos operacionais e dos impactos ambientais. A figura 1 ilustra as técnicas utilizadas para realizar a separação sólido e líquido em função do tamanho das partículas em micrometros.

Dessa forma, a eficiência da separação sólido-líquido tende a ser comprometida à medida que a granulometria das partículas se torna mais fina, exigindo o emprego de estratégias complementares para otimização do processo.

Adicionalmente, é importante destacar que, para a seleção adequada da operação unitária de separação sólido-líquido, é fundamental considerar as características reológicas e granulométricas da polpa. Em determinados casos, as polpas minerais com baixa concentração de sólidos requerem etapas prévias de

adensamento antes de serem submetidas ao processo de desaguamento (CONCHA, 2014).

Figura 1 – Técnicas de separação sólido-líquido em função do tamanho de partícula ou micro-organismo.



Fonte: Luz, Sampaio e França, 2007.

Nesse sentido, a separação sólido-líquido contempla o espessamento e a filtragem, sendo que nos dois casos, o processo é beneficiado por uma desestabilização do sistema, que ocorre em função da agregação de partículas. No espessamento, tal agregação promove o aumento da velocidade de sedimentação, já na filtragem propicia o aumento do fluxo do filtrado. Sendo assim, o desempenho das operações está diretamente interligado a eficiência do processo de agregação de partículas ultrafinas e coloidais, que conta com o auxílio de reagentes químicos (MARTINS, 2017).

2.3. Sedimentação

A sedimentação é uma operação unitária amplamente empregada em processos de separação sólido-líquido, sendo utilizada em diversos setores industriais, incluindo o tratamento de efluentes, o beneficiamento mineral e os sistemas de tratamento de água. O processo baseia-se na ação da gravidade

sobre partículas sólidas dispersas em um fluido, promovendo sua deposição quando a densidade das partículas é superior à do meio líquido. Como resultado, ocorre a formação de uma região inferior enriquecida em sólidos e de uma fase líquida clarificada na parte superior do sistema (GUIMARÃES, 2010).

A eficiência da sedimentação está diretamente relacionada às características físicas das partículas e às condições operacionais do sistema. Entre os principais fatores que influenciam o processo destacam-se o tamanho, a forma e a densidade das partículas, bem como a viscosidade do fluido e a concentração de sólidos em suspensão. De modo geral, partículas maiores e mais densas apresentam maiores velocidades de sedimentação, enquanto partículas finas tendem a permanecer dispersas por períodos mais longos devido à predominância das forças de arraste e das interações superficiais. Além disso, partículas com geometria próxima à esférica sedimentam mais facilmente do que partículas de formato irregular (LIRA, 2010).

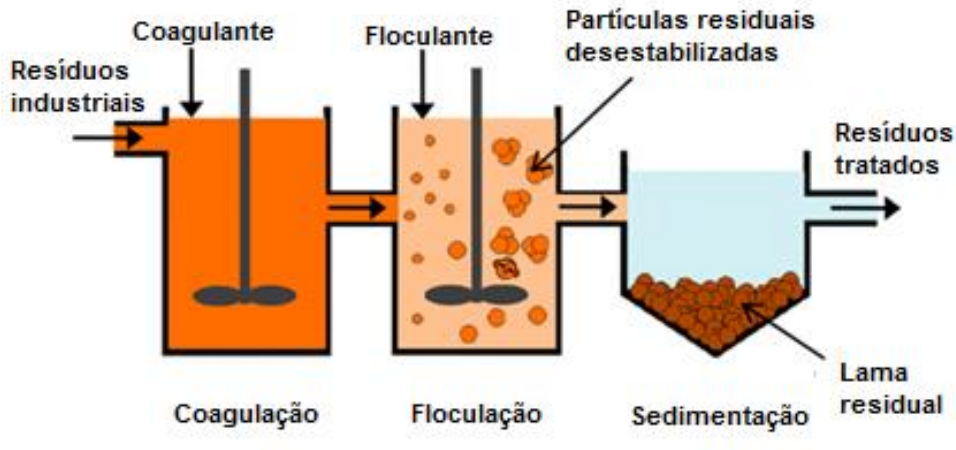
Em sistemas contendo partículas ultrafinas, a sedimentação natural pode apresentar baixa eficiência devido à reduzida velocidade de decantação. Nesses casos, frequentemente são empregados reagentes químicos, como coagulantes e floculantes, que promovem a agregação das partículas em estruturas maiores, aumentando sua massa efetiva e favorecendo sua deposição. Essa estratégia é amplamente utilizada em espessadores e decantadores industriais para aumentar a recuperação de água e melhorar a clarificação do sobrenadante.

O comportamento da sedimentação pode ser classificado em quatro mecanismos principais. A sedimentação discreta ocorre quando as partículas sedimentam individualmente, sem interação significativa entre si, sendo típica de suspensões diluídas. A sedimentação floculenta caracteriza-se pela formação de agregados durante o processo de decantação, resultando em aumento progressivo da velocidade de sedimentação. Na sedimentação zonal, observada em concentrações intermediárias a elevadas de sólidos, as partículas passam a interagir intensamente e sedimentam como uma massa única, formando uma interface bem definida entre a suspensão e o líquido clarificado. Por fim, a sedimentação compressiva ocorre nas regiões de maior concentração de sólidos, onde o peso das partículas sobrepostas provoca a compactação da estrutura sedimentada e a expulsão da água intersticial.

A compreensão desses mecanismos é fundamental para o dimensionamento e a otimização de equipamentos de sedimentação, permitindo prever o comportamento das suspensões, controlar a qualidade do líquido clarificado e maximizar a eficiência dos processos de espessamento. Dessa forma, a sedimentação constitui uma etapa essencial em operações industriais que demandam a separação eficiente entre fases sólida e líquida, contribuindo para a recuperação de água, a redução de custos operacionais e a sustentabilidade dos processos produtivos (SOUSA, 2012).

A Figura 2, ilustra como é fundamental a compreensão desses mecanismos para o dimensionamento e a otimização de unidades de sedimentação, permitindo o controle da velocidade de decantação, da concentração da polpa e da claridade do efluente final. Dessa forma, a sedimentação constitui uma etapa essencial em diversos processos de separação sólido-líquido, garantindo eficiência, economia e sustentabilidade nas operações industriais (SOUSA, 2012).

Figura 2 - Coagulação e floculação no processo de agregação e sedimentação das partículas.



Fonte: Werjen, 2022 (Adaptado).

2.4 Mecanismos de Agregação

Os mecanismos de agregação referem-se aos processos físico-químicos responsáveis pela aproximação e união de partículas dispersas em um meio líquido, resultando na formação de estruturas maiores, denominadas agregados, flocos ou coágulos. Esses mecanismos são fundamentais em sistemas coloidais,

especialmente na separação sólido-líquido, uma vez que partículas ultrafinas tendem a permanecer em suspensão devido às forças de repulsão eletrostática presentes em suas superfícies (BRATBY, 2008).

2.4.1 Dupla camada elétrica (DCE)

Em suspensões coloidais, as partículas geralmente apresentam carga elétrica superficial, o que leva à formação da dupla camada elétrica ao seu redor. Essa estrutura gera forças de repulsão entre partículas, dificultando sua aproximação e, consequentemente, a sedimentação. Nesse contexto, a agregação ocorre quando essas forças repulsivas são reduzidas ou superadas por forças atrativas, como as interações de van der Waals, conforme descrito pela teoria DLVO (HUNTER, 1981).

Os principais mecanismos de agregação incluem a coagulação e floculação. A coagulação consiste na desestabilização das partículas por meio da neutralização de suas cargas elétricas, geralmente pela adição de eletrólitos ou coagulantes. (LYKLEMA, 1988) Esse processo reduz a repulsão entre partículas, permitindo sua aproximação e formação de agregados menores e mais densos, denominados coágulos (GREGORY, 2006; LUZ et al., 2018).

Já a floculação envolve a formação de agregados maiores por meio da ação de polímeros, conhecidos como floculantes, que promovem a ligação entre partículas por mecanismos como a formação de pontes poliméricas. Nesse processo, as cadeias do polímero adsorvem-se em diferentes partículas simultaneamente, unindo-as e formando flocos maiores, mais porosos e com maior velocidade de sedimentação (VAZ, 2009).

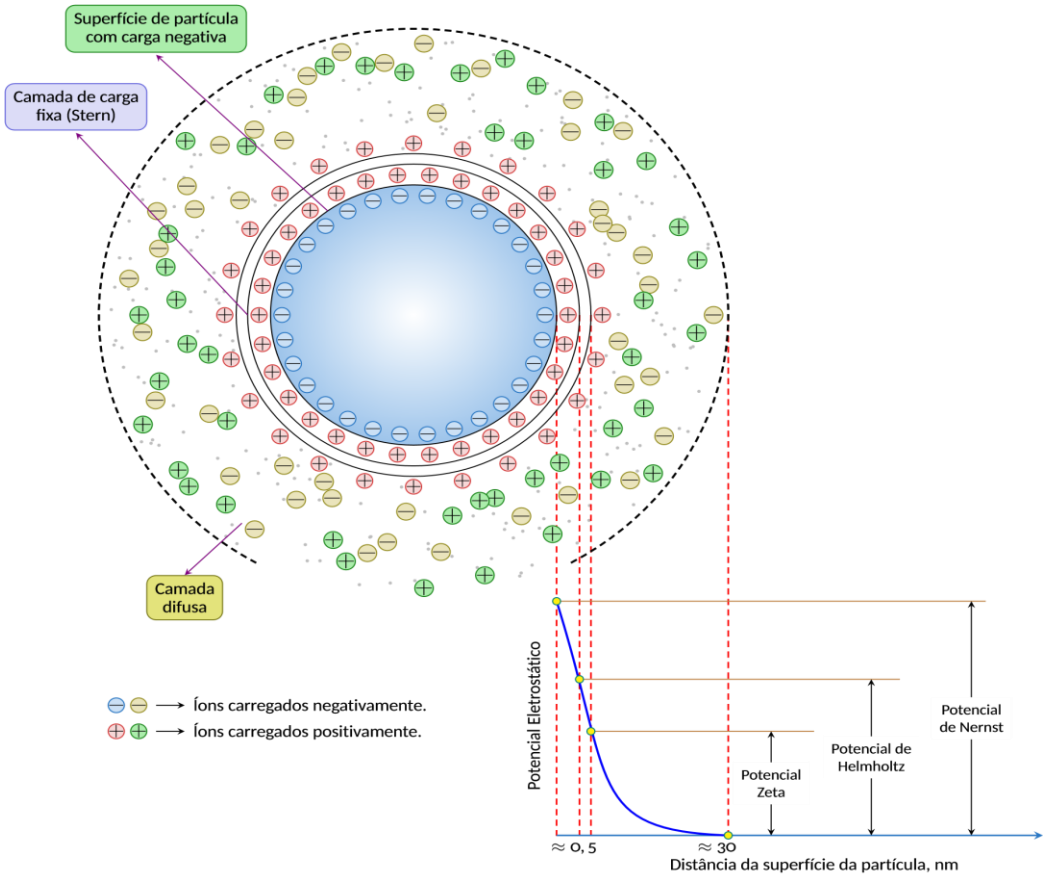
Além disso, a eficiência dos mecanismos de agregação é influenciada por diversos fatores, como pH, força iônica do meio, concentração de sólidos e características dos reagentes utilizados. O controle adequado desses parâmetros é essencial para otimizar processos como sedimentação, espessamento e clarificação, amplamente empregados na indústria mineral (WAKEMAN, 2011).

Dessa forma, os mecanismos de agregação desempenham papel fundamental na melhoria da eficiência da separação sólido-líquido, contribuindo para a formação de partículas maiores e mais densas, facilitando sua remoção do meio líquido por ação da gravidade (BRATBY, 2008).

As interações existentes entre a superfície do mineral e a água propiciam o desbalanceamento de cargas elétricas presentes na superfície do mineral. Tal desbalanceamento resulta em um excesso de cargas positivas ou negativas, dando origem a formação da dupla camada elétrica (DCE).

Essa estrutura é classicamente dividida em duas regiões: a camada de Stern, mais próxima à superfície da partícula, onde os íons encontram-se fortemente adsorvidos, e a camada difusa, onde os íons estão distribuídos de forma mais dispersa no meio líquido, sob influência de forças eletrostáticas e térmicas (HUNTER, 1981). A extensão dessa camada difusa está diretamente relacionada à concentração de eletrólitos na solução, sendo comprimida em meios com maior força iônica, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama que representa uma partícula coloidal.



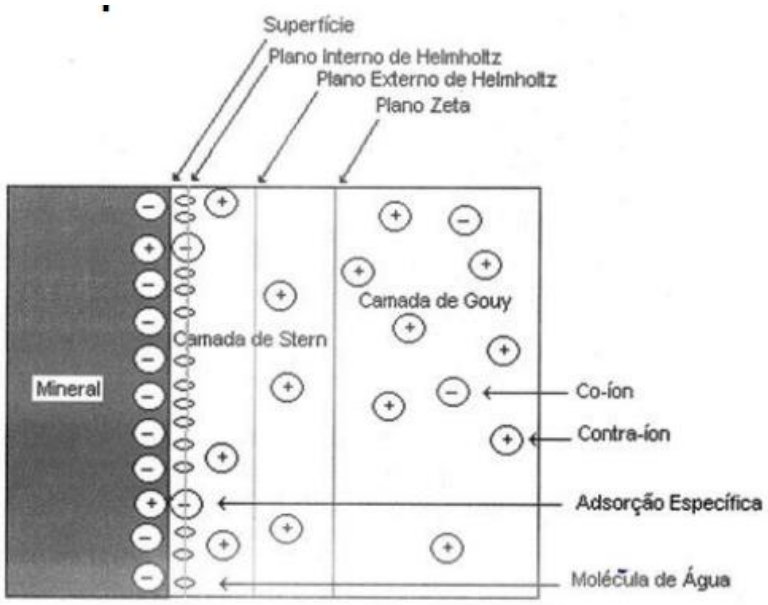
Fonte: Davis (2010).

Em suspensões aquosas, partículas minerais frequentemente desenvolvem carga superficial em decorrência de processos como ionização, adsorção seletiva de

íons ou substituições na estrutura cristalina. Como resultado, ocorre a atração eletrostática de íons de carga oposta presentes na solução, formando a chamada dupla camada elétrica ao redor da partícula. Os íons que apresentam carga oposta à carga superficial da partícula são denominados contra-íons, enquanto os íons que possuem a mesma carga da superfície são denominados co-íons. A distribuição desses íons na interface sólido-líquido desempenha papel fundamental na estabilidade das suspensões, influenciando as interações entre partículas e os processos de coagulação e floculação.

Um parâmetro importante relacionado à dupla camada elétrica é o potencial zeta, mostrado na Figura 4, que corresponde ao potencial elétrico medido na superfície de partículas dispersas em um líquido. Esse parâmetro é amplamente utilizado como indicador da estabilidade de suspensões, sendo que valores elevados de potencial zeta (positivos ou negativos) indicam maior repulsão entre partículas e, portanto, maior estabilidade do sistema (HUNTER, 1981).

Figura 4 – Diagrama que representa uma partícula coloidal.

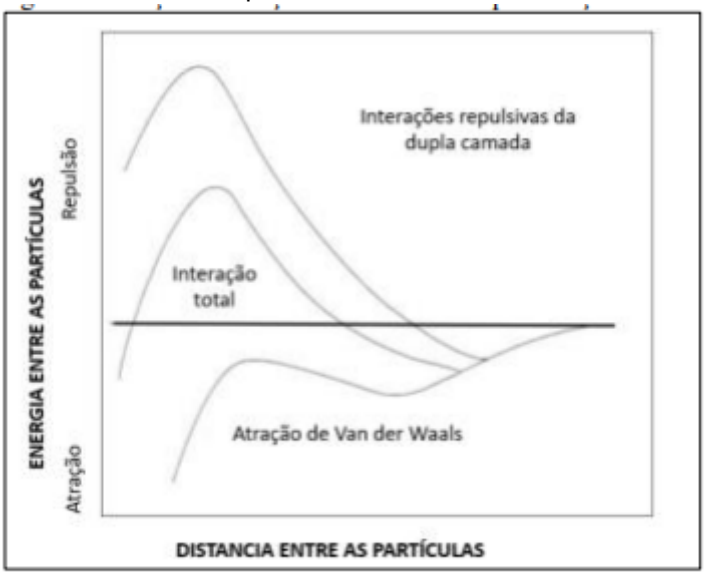


Fonte: LINS; ADAMIAN (2000)

A Figura 5 ilustra a variação da energia de interação entre duas partículas em função da distância de separação. Observa-se que a interação total resulta da combinação entre as forças atrativas de Van der Waals e as forças repulsivas da dupla camada elétrica. Quando a repulsão predomina, as partículas permanecem dispersas;

quando a atração supera a repulsão, ocorre a aproximação das partículas e a formação de flocos, favorecendo a sedimentação.

Figura 5 - Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.



Fonte: Paiva (2004).

No contexto do tratamento de minérios e da separação sólido-líquido, a compreensão da dupla camada elétrica é essencial para a otimização de processos como coagulação e floculação. A adição de reagentes químicos, como coagulantes e floculantes, atua diretamente na modificação das cargas superficiais e na compressão da dupla camada, promovendo a desestabilização das partículas e favorecendo sua agregação e sedimentação (LINS; ADAMIAN, 2000).

2.4.2 Teoria DLVO

A teoria DLVO, desenvolvida por Boris Derjaguin, Lev Landau, Evert Verwey e Theodoor Overbeek, descreve a estabilidade de sistemas coloidais a partir do balanço entre forças atrativas e repulsivas que atuam entre partículas. Segundo Lins (2000), a energia total de interação entre partículas pode ser expressa como a soma da energia de atração de van der Waals e da energia de repulsão eletrostática da dupla camada elétrica.

A presença da dupla camada elétrica está diretamente associada à estabilidade de suspensões coloidais, uma vez que promove forças de repulsão entre partículas

carregadas. Esse fenômeno é descrito pela teoria DLVO, que estabelece o balanço entre as forças de repulsão eletrostática da dupla camada e as forças de atração de van der Waals (LINS; ADAMIAN, 2000). Quando as forças repulsivas predominam, o sistema permanece estável e disperso; por outro lado, a redução da espessura da dupla camada, por exemplo, pela adição de eletrólitos, pode favorecer a aproximação das partículas e, consequentemente, sua agregação.

Na equação 1, VT representa a energia total de interação, VA corresponde à energia de atração e VR à energia de repulsão. A predominância de uma dessas contribuições determina o comportamento do sistema: quando as forças atrativas prevalecem, ocorre a agregação das partículas; por outro lado, quando as forças repulsivas são dominantes, o sistema tende a permanecer estável e disperso. Dessa forma, a teoria DLVO fornece base fundamental para a compreensão dos mecanismos envolvidos na coagulação e floculação em sistemas coloidais (LINS; ADAMIAN, 2000).

$$V_T = V_A + V_R \tag{1}$$

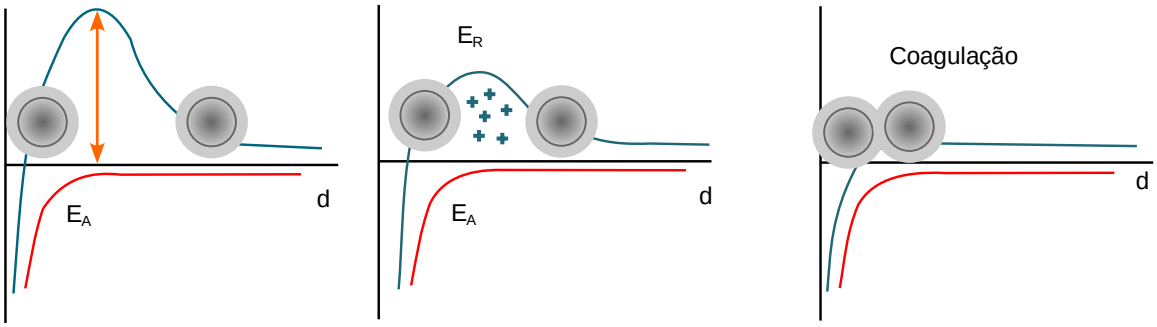
A agregação das partículas só vai ocorrer quando forças atrativas foram superiores as forças repulsivas. Caso contrário, ocorrerá a dispersão das mesmas. Paralelamente a isso, à proporção que as partículas se aproximam, a intensidade das forças de van der Waals pode se tornar até 1000 vezes maior do que as forças eletrostáticas de repulsão (ZAJIC, 1971).

2.4.3 Coagulação

Naturalmente as partículas se encontram dispersas em virtude da repulsão eletrostática ocasionada pelas nuvens eletrônicas constituídas por contra-íons. Para reduzir/eliminar tal repulsão eletrostática há atuação do processo de coagulação, momento em que as forças de superfície de natureza atrativa vencem as forças de natureza repulsiva, o que faz com que o agregado seja formado (GONÇALVES et al., 2001).

Nesse sentido, a coagulação é mais efetiva quando as partículas apresentam potencial zeta igual à zero. A Figura 6 apresenta uma representação da dupla camada elétrica (DCE) com a superfície carregada negativamente.

Figura 6 – Mecanismo simplificado de Coagulação. ER= Energia de repulsão; EA= Energia de atração.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Rubio (2011).

Os agregados formados no processo de coagulação são denominados coágulos, os quais, em comparação aos flocos formados na floculação, apresentam menor tamanho e estrutura mais compacta. Esses agregados resultam da neutralização das cargas superficiais das partículas, promovida pela compressão da dupla camada elétrica, o que reduz a repulsão eletrostática entre elas. Como consequência, os coágulos apresentam menor retenção de líquido e maior densidade, podendo sedimentar mais rapidamente em determinadas condições. Por outro lado, o agente responsável pela formação desses agregados é denominado coagulante (RICHARDSON E CONNELLY,1988).

2.4.3.1 Coagulantes

Os coagulantes são reagentes químicos, em geral eletrólitos, amplamente utilizados na desestabilização de suspensões coloidais em processos de separação sólido-líquido. Esses agregados resultam da neutralização das cargas superficiais das partículas, promovida pela compressão da dupla camada elétrica, o que reduz a repulsão eletrostática entre elas.

A adição de eletrólitos ao sistema aumenta a força iônica da solução, reduzindo a espessura da camada difusa e diminuindo o potencial zeta das partículas.

Quando esse potencial se aproxima de zero, a repulsão eletrostática entre partículas é minimizada, permitindo sua aproximação e agregação (GONÇALVES et al., 2001). Em determinados casos, especialmente com coagulantes metálicos, pode ocorrer também o mecanismo de “varredura” (sweep flocculation), no qual precipitados formados no meio incorporam partículas em suspensão, contribuindo para sua remoção (LINS; ADAMIAN, 2000).

Os coagulantes mais utilizados na indústria incluem sais inorgânicos, como sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato ferroso, além de compostos poliméricos inorgânicos, como o policloreto de alumínio (PAC). Esses reagentes apresentam elevada eficiência na neutralização de cargas e são amplamente empregados em processos de tratamento de água, efluentes e no beneficiamento mineral (LUZ et al., 2018). A escolha do coagulante adequado depende de fatores como pH do meio, concentração de sólidos, composição mineralógica e características superficiais das partículas.

Para esse estudo foi utilizado o cloreto de amina poliquaternária, mostrado na Figura 7, é um coagulante orgânico catiônico amplamente utilizado na desestabilização de suspensões coloidais, especialmente em sistemas contendo partículas com carga superficial negativa. Trata-se de um polímero com grupos amônio quaternário permanentemente carregados, o que confere elevada densidade de carga positiva e grande eficiência na neutralização das cargas das partículas. Seu mecanismo de atuação baseia-se, principalmente, nas forças intermoleculares sobre as superfícies minerais, promovendo a compressão da dupla camada elétrica e a redução do potencial zeta, o que favorece a agregação das partículas e a formação de coágulos. Em comparação aos coagulantes inorgânicos tradicionais, os poliquaternários apresentam vantagens como maior eficiência em baixas dosagens e menor sensibilidade a variações de pH. (BOLTO; GREGORY, 2007).

Os agregados formados no processo de coagulação são denominados coágulos, os quais, em comparação aos flocos formados na floculação, apresentam menor tamanho e estrutura mais compacta. A coagulação é frequentemente utilizada como etapa preliminar à floculação, potencializando a eficiência global do processo de separação sólido-líquido (VALADÃO; ARAÚJO, 2007).

Figura 7 – Nalkat 7607/Nalco -Coagulante



Fonte: Autoria Própria

No contexto do tratamento de minérios e rejeitos finos, a aplicação de coagulantes é fundamental para melhorar o desempenho de operações como espessamento e clarificação, especialmente em sistemas com alta fração de partículas ultrafinas. Ao promover a desestabilização das partículas, esses reagentes facilitam sua agregação e sedimentação, contribuindo para a recuperação de água de processo e para a redução dos impactos ambientais associados à disposição de rejeitos (WAKEMAN, 2011).

2.4.4 Floculação

Baltar (2021) afirma que a floculação é um mecanismo dependente da ação de um polímero que adsorve na superfície das partículas de forma simultânea, formando flocos, refere-se ao processo pelo qual partículas finas ou pequenos agregados se unem para formar estruturas maiores. Nesse processo, partículas ultrafinas são agregadas por meio da ação de macromoléculas, geralmente polímeros conhecidos como floculantes. Esses polímeros possuem a capacidade de se adsorver simultaneamente na superfície de diferentes partículas, promovendo sua ligação por meio de mecanismos como a formação de pontes poliméricas. Como resultado, formam-se agregados maiores, mais porosos e com maior capacidade de sedimentação, denominados flocos (BALTAR, 2021).

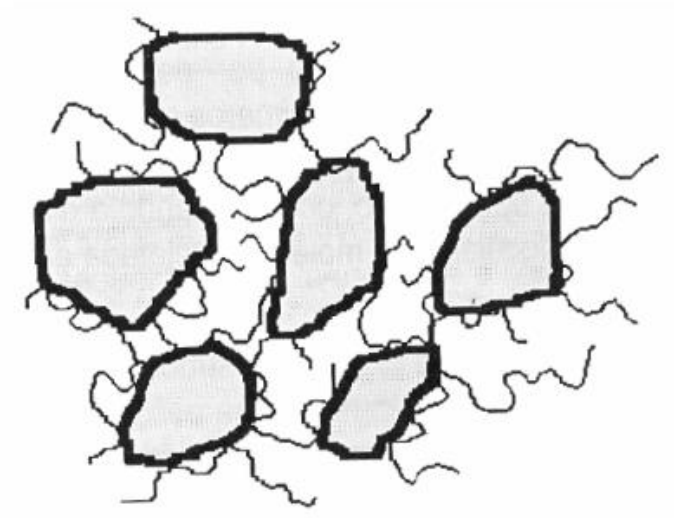
Ainda nesse sentido, a floculação forma agregados bem mais abertos que os agregados formados por meio da coagulação. Para formar tais pontes os floculantes mais utilizados são polímeros orgânicos de cadeia longa, naturais ou sintéticos (polieletrólitos) (LACERDA, 2004).

2.4.4.1 Mecanismos de Floculação

A floculação pode ocorrer por meio de dois mecanismos principais ,a floculação por pontes (*bridging flocculation*) ou a floculação por reversão localizada de carga (*patch flocculation*) (BOLTO; GREGORY 2007).

A floculação por pontes ocorre predominantemente quando são utilizados polímeros de elevado peso molecular, que podem ser não iônicos ou com carga elétrica de mesmo sinal da superfície mineral. Conforme demonstrado na Figura 8, é possível visualizar que, em tais sistemas somente uma parte da molécula interage diretamente com o sólido, as demais partes da cadeia polimérica estendem-se em forma de caudas propiciando o contato e a adsorção em outras partículas. Diante disso, agregados maiores podem ser formados, por meio da união de flocos, que podem possuir centenas de partículas individuais. Além disso, por apresentarem flocos com estrutura aberta, são grandes, flexíveis, resistentes e retêm muita água em seu interior, além de ser um processo rápido (LACERDA, 2004).

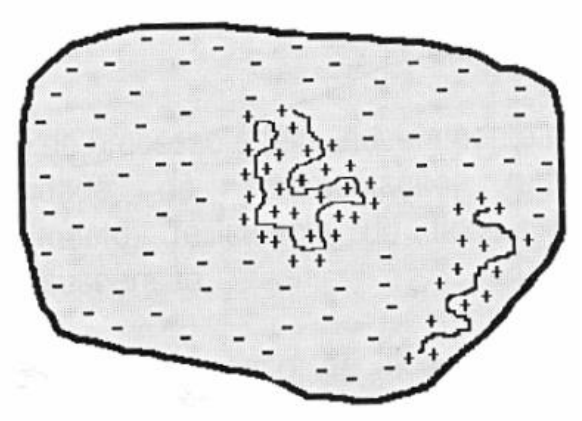
Figura 8 – Mecanismo de floculação por pontes.



Fonte: (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Já a floculação por reversão localizada de carga ocorre quando são utilizados polímeros de médio ou baixo peso molecular, de carga elétrica oposta à da superfície da partícula, que ao adsorver sobre o mineral, com carga contrária, reverte a carga elétrica da superfície na área que foi coberta pelo polímero. Diante disso, a superfície passa a apresentar uma distribuição heterogênea de cargas positivas e negativas, conforme ilustrado na Figura 9. Assim, quando houver colisões entre áreas com cargas opostas de duas partículas, o floco será formado. Além disso, os flocos formados são pequenos, compactos, rígidos e densos, e o processo de floculação é lento (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Figura 9 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.



Fonte: (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

2.4.4.2 Floculantes

Os floculantes podem ser classificados de acordo com sua origem, carga elétrica e peso molecular. Quanto à origem, podem ser naturais, sintéticos ou modificados; em relação à carga, podem ser aniônicos, catiônicos ou não iônicos; e, quanto ao peso molecular, são geralmente classificados como de baixo ($PM < 10^5$), médio ($10^5 < PM < 10^6$) ou alto peso molecular ($PM > 10^6$) (LUZ et al., 2018). Essas características influenciam diretamente seu desempenho, uma vez que determinam os mecanismos de interação com as partículas e a eficiência da formação dos flocos (ZHANG et al.,2022).

Na indústria mineral, as poliacrilamidas aniônicas e não iônicas são amplamente utilizadas como floculantes em operações de separação sólido-líquido, devido à elevada eficiência na formação de flocos maiores e no aumento da

velocidade de sedimentação. Essa eficiência está associada, principalmente, ao elevado peso molecular desses polímeros, que favorece o mecanismo de ponteamento entre partículas e a formação de agregados mais estáveis (MOODY, 1992; FRANKS et al., 2023). Para esse estudo os floculantes utilizados foram poliacrilamida – aniônico e não-iônico. A Figura 10 ilustra o flonex, um coagulante aniônico.

Figura 10 – Flonex 959 -Floculante Aniônico



Fonte: Autoria Própria

Fatores operacionais como pH, força iônica do meio, concentração de sólidos e dosagem de floculante influenciam significativamente o desempenho do processo de floculação. A escolha adequada do tipo de polímero e das condições operacionais é fundamental para maximizar a eficiência da sedimentação, melhorar a clarificação do sobrenadante e otimizar o adensamento de rejeitos finos, especialmente em sistemas com alta fração de partículas ultrafinas (WAKEMAN, 2011).

Dessa forma, os floculantes desempenham papel essencial nos processos de espessamento e tratamento de rejeitos, contribuindo para a melhoria da separação sólido-líquido, aumento da recuperação de água e redução dos impactos ambientais associados às operações minerais (LIU et al, 2020).

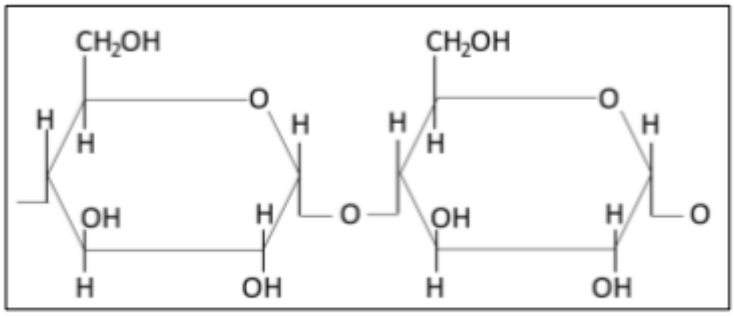
2.4.4.3 Amido de fécula de mandioca

O amido tem sido amplamente investigado como alternativa aos floculantes sintéticos, atuando como um polímero natural capaz de promover a agregação de partículas finas em sistemas aquosos. Sua eficiência como floculante está associada à sua estrutura macromolecular e às suas propriedades físico-químicas, sendo influenciada, entre outros fatores, pela sua origem vegetal, podendo ser obtido de fontes como batata, mandioca e arroz (LEITE, 2019).

Do ponto de vista estrutural, o amido é um homopolissacarídeo constituído por duas frações principais: amilose e amilopectina. A amilose, mostrada na Figura 11, apresenta estrutura predominantemente linear, enquanto a amilopectina (Figura 12) possui estrutura altamente ramificada, o que influencia diretamente o comportamento do polímero em solução (DENARDIN; SILVA, 2009). Além disso, as moléculas de amido apresentam elevada quantidade de grupos hidroxila, conferindo caráter hidrofílico (Afinidade com a água) ao material e possibilitando a formação de ligações de hidrogênio com a água.

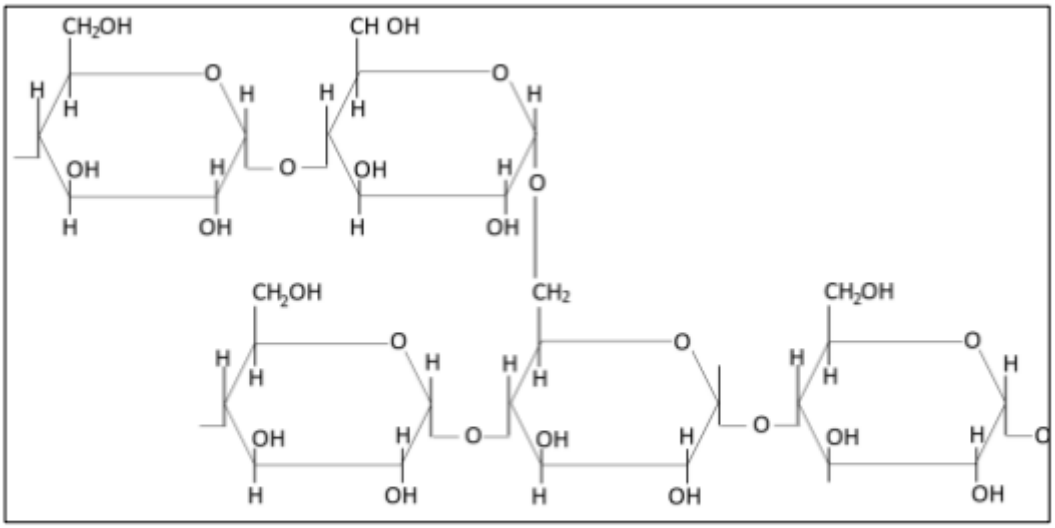
O mecanismo de atuação do amido como floculante está associado, principalmente, à formação de pontes entre partículas (*bridging flocculation*), em função do seu elevado peso molecular. Nesse processo, as cadeias poliméricas adsorvem-se na superfície de diferentes partículas, promovendo sua ligação e formando flocos maiores, mais porosos e com maior velocidade de sedimentação.

Figura 11- Estrutura química da amilose



Fonte: Baltar (2021).

Figura 12- Estrutura química da amilopectina



Fonte: Baltar (2021).

A utilização do amido apresenta diversas vantagens em relação aos floculantes sintéticos, como as poliacrilamidas. Dentre essas vantagens, destacam-se o baixo custo, a ampla disponibilidade, por ser derivado de fontes vegetais renováveis, além de sua biodegradabilidade e baixa toxicidade ambiental. Essas características tornam o amido uma alternativa promissora no contexto de processos mais sustentáveis na indústria mineral (LEITE, 2019).

O amido utilizado corresponde à fécula de mandioca, uma fonte amplamente disponível no Brasil e de grande relevância industrial. A fécula de mandioca apresenta elevado teor de pureza, baixo conteúdo de lipídios e proteínas e alta concentração de amido, o que favorece sua aplicação como floculante. Além disso, sua composição, geralmente rica em amilopectina, contribui para a formação de cadeias poliméricas mais ramificadas, o que pode influenciar positivamente o mecanismo de formação de pontes entre partículas. Outro aspecto relevante é a facilidade de gelatinização desse material, que ocorre em temperaturas relativamente baixas, permitindo a solubilização das cadeias e sua atuação eficiente na agregação de partículas finas. Dessa forma, a fécula de mandioca se destaca como uma alternativa promissora, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico e ambiental, para aplicação em processos de separação sólido-líquido (BALTAR, 2021).

Entretanto, a eficiência do amido como floculante pode variar significativamente em função de sua origem, composição (proporção amilose/amilopectina) e das

condições operacionais do sistema, como pH, concentração de sólidos e presença de íons em solução, fatores que devem ser considerados na sua aplicação em processos industriais.

2.5 Moduladores de pH

Os moduladores de pH são reagentes químicos utilizados para controlar a acidez ou alcalinidade de sistemas aquosos, desempenhando papel fundamental em processos de separação sólido-líquido na indústria mineral. O pH do meio influencia diretamente as propriedades superficiais das partículas, a ionização de espécies químicas e a eficiência de reagentes como coagulantes e floculantes, sendo, portanto, um parâmetro crítico para a otimização de operações como coagulação, floculação e espessamento (LINS; ADAMIAN, 2000).

A atuação dos moduladores de pH está associada à variação da concentração de íons H^+ e OH^- na solução, afetando o potencial zeta das partículas e a espessura da dupla camada elétrica. Em valores de pH próximos ao ponto isoelétrico, a carga superficial tende a se reduzir, favorecendo a agregação das partículas. Por outro lado, em condições de pH mais afastadas desse ponto, ocorre o aumento da repulsão eletrostática, o que pode dificultar a sedimentação (HUNTER, 1981).

Os principais moduladores de pH utilizados na indústria mineral incluem reagentes alcalinizantes, como hidróxido de cálcio (cal), hidróxido de sódio (NaOH) e carbonato de sódio, e reagentes acidificantes, como ácido sulfúrico e ácido clorídrico (HCl). A escolha do reagente depende das características do sistema, como composição mineralógica, presença de espécies dissolvidas e condições operacionais (LUZ et al., 2018).

No contexto da floculação, o controle do pH é essencial para garantir a eficiência dos polímeros utilizados, uma vez que a carga e a conformação das cadeias poliméricas podem ser influenciadas pelo meio. Para floculantes naturais, como o amido, o pH pode afetar sua solubilidade e interação com as partículas minerais, impactando diretamente a formação e a estabilidade dos flocos (BALTAR, 2021).

Dessa forma, o controle adequado do pH contribui significativamente para a melhoria da eficiência dos processos de separação sólido-líquido, promovendo

condições favoráveis à agregação das partículas e à otimização das etapas de espessamento e clarificação.

2.6 Espessamento

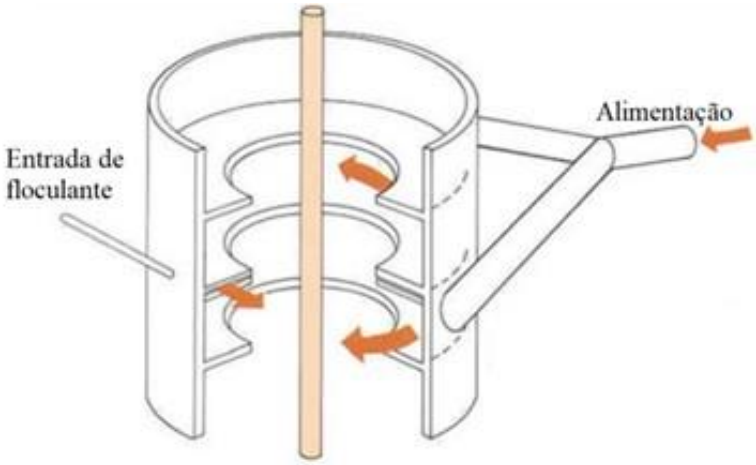
O processo de espessamento de polpa é uma operação de separação sólido-líquido baseada na sedimentação, cujo objetivo é gerar um material mais concentrado em sólidos (*underflow*) e/ou um líquido mais limpo e pobre em sólidos *(overflow*) (LUZ et al., 2018). Esse processo é amplamente utilizado na indústria em sistemas contínuos para adensamento de polpas, em etapas que envolvem precipitação e no tratamento de efluentes, entre outras aplicações. Na mineração, os sedimentadores mais comuns são projetados para produzir polpas altamente concentradas, destinadas à disposição em barragens, cavas ou galerias subterrâneas.

O equipamento mais utilizado para fazer o espessamento é o espessador, a função principal é receber uma alimentação diluída e entregar um produto final com teor de sólidos bem maior, enquanto o líquido sobrenadante apresenta baixa concentração de sólidos (SOUSA, 2012). Os sedimentadores são divididos em duas categorias: espessadores e clarificadores, dependendo do produto final desejado—sólido ou líquido, respectivamente (SANTOS, 2014). Os espessadores têm como foco a recuperação do material sólido, produzindo um produto espesso e denso. Já os clarificadores são usados quando o objetivo é obter um líquido clarificado com baixos teores de sólidos.

Na prática industrial, os espessadores são mais usados e geralmente operam de forma contínua. Esses equipamentos podem ser construídos em concreto armado ou aço. As estruturas metálicas são mais comuns para unidades de menor diâmetro por apresentarem menor custo (CONCHA, 2014). A variação entre os tipos de espessadores ocorre principalmente devido à geometria do tanque e à forma de alimentação. De maneira geral, eles consistem em tanques cilíndrico-cônicos equipados com um sistema de raspagem responsável por transportar o material sedimentado até a descarga, inclusive, representa a parte mais onerosa do equipamento, como ilustrado na Figura 13. Os braços raspadores (*rakes*), também chamados de rastelos ou ancinhos, são fixados na estrutura que sustenta o tubo

central de alimentação. O projeto dessas peças leva em conta o torque necessário ao motor e deve garantir resistência e flexibilidade para lidar com diferentes tipos e quantidades de material (FRANÇA E MASSARANI, 2018). O modelo clássico apresentado por Dorr, possuía um tanque cilíndrico de 6 m de diâmetro, incluindo o poço de alimentação, a calha de coleta do overflow, os *rakes* e o sistema de descarga do underflow. Esses componentes permanecem presentes nos espessadores modernos. Em termos econômicos, o sistema de raspagem representa o principal custo do equipamento, pois é responsável pela movimentação dos sedimentos até o ponto de saída (LUZ et al., 2018). A rotação dos *rakes* costuma ser baixa, por volta de uma volta por hora, podendo ser acionados por motor central ou por um sistema periférico. Além disso, podem contar com estruturas adicionais, tanto de suporte quanto de alimentação (CONCHA, 2014; LUZ et al., 2010).

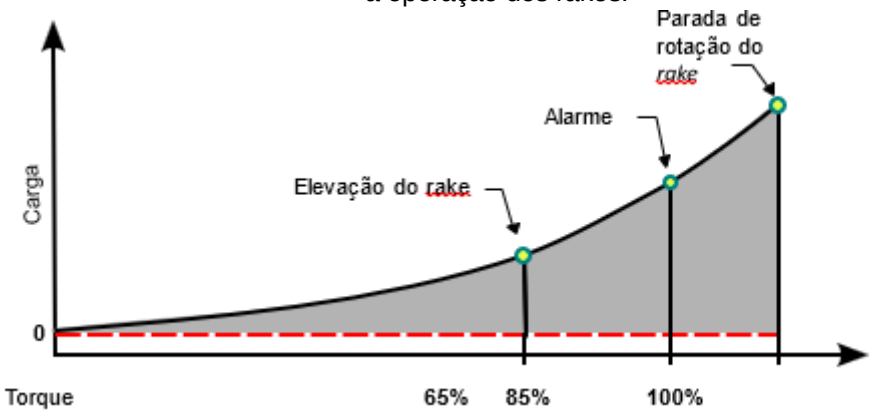
Figura 13– Poço de alimentação com suas entradas tangenciais e defletores internos.



Fonte: Adaptado de Concha (2014).

Nos modelos mais atuais de espessadores, os braços raspadores (*rakes)* são capazes de se elevar automaticamente quando o torque do motor — monitorado por sensores eletrônicos — ultrapassa um limite pré-estabelecido. A Figura 14 ilustra como o torque varia conforme a carga, além de mostrar o circuito eletrônico responsável por esse controle.

Figura 14 – Curva de variação do torque e medidas de segurança tomadas e circuito eletrônico para a operação dos rakes.



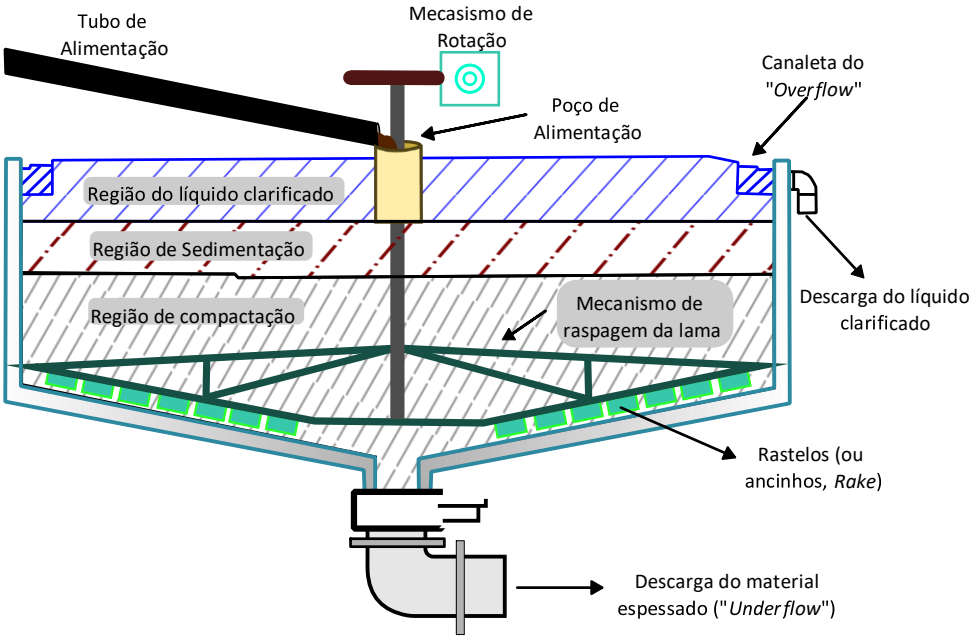
Fonte: Adaptado de Metso Corporation (2018)

Em relação à alimentação, ela ocorre dentro de um cilindro concêntrico de pequenas dimensões, localizado a até 1 metro abaixo da superfície nos espessadores convencionais. Esse dispositivo, chamado de *feedwell*, tem a função de promover a mistura da polpa de alimentação com o floculante (CONCHA, 2014; WILLS E FINCH, 2016). A entrada da polpa é tangencial, o que reduz a turbulência dentro do feedwell.

Outro processo importante é a retirada do líquido clarificado (sobrenadante). Essa água sai pela parte superior do espessador por meio de canaletas instaladas ao redor de todo o tanque. As canaletas do *overflow* coletam a água recuperada e a conduzem lentamente para evitar que partículas finas sejam arrastadas junto com o efluente. A Figura 15 mostra como essas canaletas são distribuídas em um espessador convencional.

A velocidade de sedimentação e o tempo de operação são fatores fundamentais no desempenho de um espessador. Quando a polpa apresenta baixa concentração de sólidos e as partículas estão relativamente afastadas umas das outras, o processo de queda das partículas pode ser descrito pela Lei de Stokes — válida para partículas entre 1 µm e 50 µm (WILLS, 1992). De acordo com essa lei, representada na Equação 2, a velocidade terminal de sedimentação depende apenas da viscosidade do fluido, da densidade e do diâmetro da partícula.

Figura 15 – Vista lateral de um espessador convencional.



Fonte: Adaptado de Pereira (2019).

$$V = \left(\frac{1}{18 \times \eta}\right) \times d^2 \times g \times (\rho_s - \rho_f) \qquad (2)$$

Onde:

V: Velocidade terminal de sedimentação [m/s];

d: Diâmetro da partícula [m];

g: gravidade [m/s2];

ρ_s:Peso específico do sólido [kg/m3];

ρ_f:Peso específico da polpa [kg/m3];

η:Viscosidade do fluido [kg/m.s].

A partir da interpretação da Equação 2, é possível extrair algumas conclusões relevantes. Entre elas, destacam-se:

- Quando duas partículas de mesma densidade estão em suspensão em um fluido, aquela que possui maior diâmetro sedimenta mais rapidamente, apresentando maior velocidade terminal;

- Entre duas partículas de igual tamanho, a que possui maior densidade terá maior velocidade terminal quando inserida no mesmo fluido.

Contudo, à medida que a concentração de sólidos aumenta e a distância entre as partículas diminui, a aplicação da Lei de Stokes perde validade, deixando de representar adequadamente o comportamento sedimentar do sistema (RICHARDSON; ZAKI, 1954; WILLS; FINCH, 2016). Partículas com diâmetros inferiores a 0,010 mm apresentam massa e velocidade de sedimentação muito reduzidas sob o efeito exclusivo da gravidade, tornando-se suscetíveis a outros fenômenos, como o movimento browniano.

No contexto atual da mineração, diversos desafios têm se intensificado, incluindo a necessidade de reduzir o consumo de água, aumentar a eficiência na recuperação da água de processo, produzir rejeitos com maior teor de sólidos e garantir o adequado manejo ambiental desses materiais. Diante disso, a otimização das operações de espessamento — sobretudo aquelas voltadas à geração de polpas de alta densidade — tornou-se essencial tanto na operação de plantas de beneficiamento mineral quanto no desenvolvimento de novos empreendimentos (FRANÇA E MASSARANI, 2018).

Nesse contexto, o espessador desempenha papel fundamental no tratamento deste rejeito, pois visa aumentar a concentração de sólidos e reduzir o volume de água livre, preparando o material para etapas subsequentes, como filtração, empilhamento drenado ou até mesmo disposição em barragens aprimoradas.

No entanto, devido à natureza coloidal desse rejeito, o desempenho do espessador frequentemente é limitado, tornando necessário o uso de estratégias adicionais, como a adição de reagentes auxiliares (floculantes e coagulantes), que promovem a agregação das partículas finas e favorecem o adensamento da lama (OWEN *et al.*, 2023). A aplicação de floculantes poliméricos em suspensões de rejeitos minerais promove a agregação das partículas finas e melhora a separação sólido-líquido.

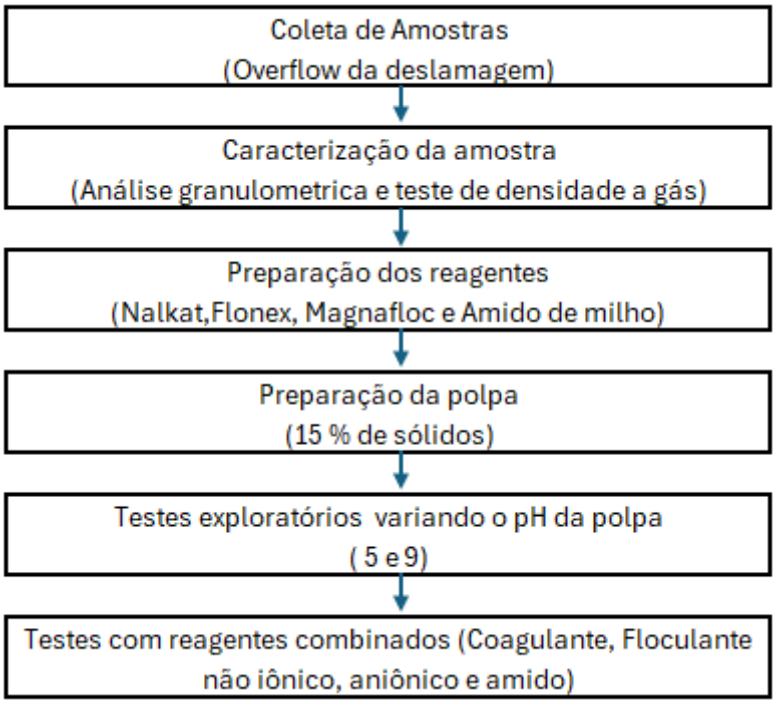
3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados na execução do presente trabalho. A metodologia empregada baseou-se em ensaios de sedimentação em proveta, com o objetivo de avaliar uma concentração ideal, o comportamento de rejeitos finos de fosfato submetidos a diferentes combinações de reagentes, sob distintas condições de pH, esses ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET.

Os experimentos foram conduzidos visando determinar a combinação mais eficiente de reagentes em suas devidas concentrações, associada ao pH ideal, para promover a melhor performance na separação sólido-líquido. Para isso, foram realizados testes laboratoriais controlados, nos quais se analisaram parâmetros como a velocidade de sedimentação, a clarificação do sobrenadante e o controle do pH.

Para facilitar a compreensão da metodologia adotada neste trabalho, a Figura 16 apresenta um fluxograma que ilustra a sequência cronológica das etapas metodológicas desenvolvidas.

Figura 16-Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Autoria própria.

3.1 Preparação da amostra

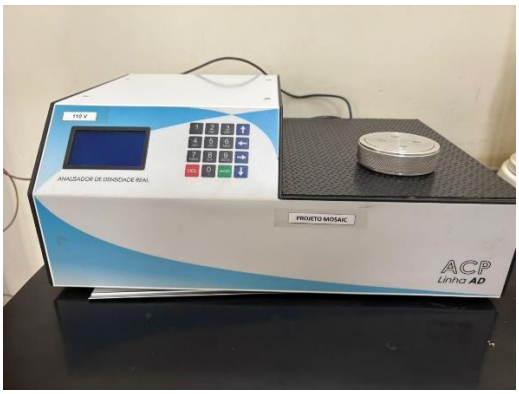
A amostra utilizada neste estudo foi coletada no overflow da etapa de deslamagem do hidrociclone de uma mineradora localizada em Serra do Salitre. A lama fosfática foi inicialmente homogeneizada em uma pilha com aproximadamente 1,0 m de comprimento. A homogeneização consistiu na retirada de uma camada de cerca de 10 cm de uma das extremidades da pilha, seguida de sua redistribuição sobre o restante do material. O mesmo procedimento foi repetido na extremidade oposta, promovendo a mistura e a uniformização da amostra. Após a homogeneização, realizou-se o quarteamento do material, do qual foram coletadas sacarias com massa aproximada de 150 g para a realização dos ensaios experimentais.

3.2 Caracterização da amostra

Como parte da caracterização do material, uma alíquota representativa da amostra foi encaminhada ao laboratório para determinação da distribuição granulométrica por difração a laser, utilizando o granulômetro CILAS 1090. Essa análise teve como finalidade caracterizar o material e determinar sua distribuição granulométrica, fornecendo informações sobre a granulometria efetiva da lama fosfática utilizada nos ensaios experimentais.

O ensaio de densidade foi realizado utilizando um densímetro a gás (nitrogênio-N_2), ilustrado na Figura 17, equipamento amplamente empregado na determinação da densidade real de sólidos particulados. O princípio de funcionamento baseia-se na técnica de deslocamento de gás, na qual o nitrogênio, devido ao seu pequeno diâmetro molecular, penetra nos poros abertos do material, permitindo a determinação precisa do volume real das partículas. A partir da relação entre a massa da amostra e o volume obtido, calcula-se a densidade real do material. Esse método apresenta elevada precisão e repetibilidade, sendo especialmente indicado para materiais finos e porosos (WEBB; ORR, 1997).

Figura 17- Densímetro a gás



Fonte: Autoria própria

Para a realização do ensaio, a amostra de lama de fosfato foi previamente seca, a fim de eliminar a umidade que poderia interferir nos resultados. Inicialmente, uma massa conhecida da amostra foi inserida na câmara de análise do equipamento, que foi posteriormente vedada. Em seguida, o nitrogênio foi introduzido na câmara e a pressão inicial do sistema foi registrada. O gás foi então expandido para um volume conhecido, promovendo uma variação de pressão. Com base na Lei de Boyle (P1.V1=P2.V2). O equipamento determinou o volume real ocupado pela amostra. Por fim, a densidade real foi calculada automaticamente pela razão entre a massa da amostra e o volume obtido.

3.3 Preparação dos reagentes

Os reagentes Nalkat 7607/Nalco (Cloreto de amina poliquaternária), Magnafloc 351 (poliacrilamida-não-iônico), Flonex 953 (poliacrilamida – aniônico) foram preparadas na concentração de 0,05%, utilizando-se 0,25 g de soluto e 499,75 g de água como solvente.

- Inicialmente, os componentes foram pesados individualmente em balança analítica e, em seguida, transferidos para um béquer adequado;
- Posteriormente, adicionaram-se 499,75 g de água ao béquer contendo o soluto;

- A mistura foi então submetida à agitação em agitador magnético, em velocidade constante (nível 4), por um período de 60 minutos, de modo a garantir a completa dissolução e homogeneização dos reagentes.

A preparação das soluções dos floculantes Magnafloc 351 e Flonex 953 foi realizada com frequência máxima de dois dias, com o objetivo de garantir a estabilidade e a eficiência dos reagentes durante os ensaios. Já a solução do coagulante Nalkat 7607 foi preparada semanalmente, respeitando-se um intervalo máximo de sete dias para sua utilização nos testes experimentais. Após o preparo, as soluções foram mantidas em repouso por aproximadamente 1 hora antes da aplicação, com o objetivo de permitir a completa hidratação e estabilização das cadeias poliméricas, favorecendo o desenvolvimento adequado das interações intermoleculares e garantindo maior eficiência de atuação dos reagentes.

O Amido de mandioca foi preparado na concentração de 3%. Com isso, a preparação do reagente tem a sequência:

- Inicialmente, pesaram-se 5 g de amido num beque;
- Em seguida, adicionaram-se 45 g de água, promovendo a dispersão inicial do amido;
- Posteriormente, o sistema foi submetido à agitação mecânica, ajustado para aproximadamente 400 rpm, garantindo a homogeneização da suspensão;
- Após estabilização da mistura, adicionaram-se 12,5 g de solução de hidróxido de sódio (10%), iniciando-se imediatamente a contagem do tempo reacional;
- A mistura permanece sob agitação por 10 minutos, sendo então aumentada a velocidade de agitação para cerca de 600 rpm, a fim de intensificar o processo de gelatinização;
- Decorrido esse período, adicionaram-se 104,16 g de água ao sistema, mantendo-se a agitação por mais 10 minutos;
- Por fim, a velocidade de agitação foi ajustada novamente para 400 rpm, garantindo a completa homogeneização do gel formado.

A solução de floculante à base de fécula de mandioca foi preparada diariamente, imediatamente antes da realização dos ensaios. Esse procedimento foi adotado devido à menor estabilidade do amido em solução ao longo do tempo, uma vez que

suas cadeias poliméricas podem sofrer degradação e perda de eficiência floculante, comprometendo a formação de pontes entre partículas.

3.4 Teste de sedimentação

Os ensaios de sedimentação na proveta foram conduzidos em dois cenários distintos: um com o pH natural (7,33) da amostra e outro com o pH ajustado (5 e 9). Dessa forma, os tópicos a seguir apresentam de maneira detalhada cada condição experimental, bem como as diferenças metodológicas observadas entre os respectivos testes.

3.4.1 Preparação da polpa

Para a preparação da polpa com concentração de 15% de sólidos**,** foram pesados 166,23 g de rejeito fosfático, os quais foram transferidos para uma proveta de 1.000 mL**.** Em seguida, foram adicionados 941,00 g de água, de modo a obter a concentração de sólidos desejada. Posteriormente, a suspensão foi homogeneizada por meio de cinco inversões do agitador de proveta, garantindo a adequada dispersão das partículas no meio líquido antes da realização dos ensaios.

Para a determinação do pH da polpa, realizou-se inicialmente o acionamento e a calibração do pHmetro (Figura 18), de modo a garantir a confiabilidade e a precisão das medições. Após a estabilização do equipamento, o eletrodo foi cuidadosamente imerso na polpa previamente preparada, assegurando o contato adequado com o meio para a obtenção de leituras representativas.

Figura 18-pHmetro (HANNA-Edge)



Fonte: Autoria própria

O ajuste do pH foi realizado por meio da adição gradual de soluções de ácido clorídrico (HCl) a 10% e de hidróxido de sódio (NaOH) a 10%, empregadas para promover, respectivamente, a acidificação e a alcalinização da polpa. As soluções foram adicionadas gota a gota, de forma controlada, até que os valores de pH estabelecidos para cada ensaio fossem atingidos, garantindo a estabilidade das condições experimentais antes da realização dos testes de sedimentação.

O procedimento foi conduzido de maneira padronizada em todos os testes, assegurando maior confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados experimentais.

3.4.2 pH Natural

Para a avaliação do comportamento de sedimentação do rejeito fosfático, foram realizados ensaios em proveta graduada de 1.000 mL, seguindo a metodologia clássica de sedimentação em proveta. Inicialmente, a polpa foi preparada com concentração de 15% de sólidos. Em seguida, foi fixada uma fita adesiva na parte externa da proveta, destinada ao registro da posição da interface sólido-líquido ao longo do ensaio.

Posteriormente, foram adicionados os reagentes avaliados — Nalkat 7607/Nalco (cloreto de amina poliquaternária), Magnafloc 351 (poliacrilamida não iônica) ou Flonex 953 (poliacrilamida aniônica) — nas concentrações previamente estabelecidas de 10 g/t, 30 g/t e 50 g/t, conforme o delineamento experimental. Após a adição do reagente correspondente, a polpa foi homogeneizada por meio de cinco inversões do agitador de proveta, promovendo a adequada dispersão das partículas e do reagente em todo o sistema.

Imediatamente após a homogeneização, iniciou-se a cronometragem do ensaio de sedimentação. Simultaneamente, foi realizado o monitoramento da altura da interface sólido-líquido, registrando-se, na fita fixada à proveta, a posição da interface em cada intervalo de tempo previamente definido. As leituras foram efetuadas nos tempos de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720, 780, 840, 900, 960, 1020, 1080, 1140, 1200, 1260, 1320, 1380, 1440, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300 e 3600 segundos. Os dados obtidos permitiram a construção das curvas de sedimentação, relacionando a altura da interface sólido-líquido em função do tempo.

Inicialmente, foram realizados dois ensaios de sedimentação em pH natural, sem a adição de reagentes, com o objetivo de estabelecer uma condição de referência para o sistema. Na sequência, foram conduzidos ensaios variando-se apenas as concentrações dos reagentes Nalkat 7607/Nalco, Magnafloc 351 e Flonex 953, nas dosagens de 10 g/t, 30 g/t e 50 g/t, visando avaliar a influência da concentração de cada reagente sobre o desempenho da sedimentação.

Todos os ensaios foram conduzidos sob condições experimentais controladas e repetidos quando necessário, de modo a garantir a confiabilidade, a reprodutibilidade e a consistência dos resultados obtidos.

3.4.3 Variando pH

A diferença metodológica entre os ensaios realizados em pH natural e aqueles com pH ajustado consiste no controle prévio do pH da polpa com hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl), antes da adição dos reagentes, conforme as condições estabelecidas para cada teste. Nesse sentido, foram realizados ensaios com ajuste de pH para 5,0 e 9,0, mantendo-se a concentração de 30g/t.

Ressalta-se que, após o ajuste do pH, os reagentes foram adicionados nas dosagens previamente definidas, mantendo-se constantes os demais parâmetros operacionais.

Posteriormente, foram realizados 24 ensaios adicionais, mantendo-se o pH fixo em 9,0, nos quais se variaram as concentrações dos reagentes resultando a concentração ideal total de 30g/t de reagente. Nessa etapa, incluiu-se também a fécula de mandioca como floculante, visando avaliar seu desempenho em comparação aos demais reagentes.

3.4.4 Reagentes combinados

Para a realização dos ensaios envolvendo combinações de reagentes, foi adotada uma concentração total de 30 g/t, em meio ajustado para pH=9. Já o amido de mandioca teve uma dosagem fixa de 550g/t. A definição das combinações e proporções dos reagentes foi realizada por meio de planejamento estatístico experimental no sowftore Minitab, resultando em um total de 24 ensaios. As diferentes composições utilizadas em cada teste encontram-se apresentadas no quadro 1.

Quadro 1- Massas das combinações dos reagentes em proporções

Ensaio	Nalkat	Magnafloc	Fluonex	Amido
1	0,33	0,33	0,33	1,00
2	1,00	0,00	0,00	-1,00
3	0,33	0,67	0,00	1,00
4	0,00	0,33	0,67	1,00
5	0,00	0,00	1,00	-1,00
6	0,33	0,33	0,33	-1,00
7	0,00	0,67	0,33	1,00
8	0,00	0,33	0,67	-1,00
9	0,00	1,00	0,00	1,00
10	0,00	1,00	0,00	-1,00
11	0,00	0,67	0,33	-1,00
12	0,33	0,33	0,33	-1,00
13	0,00	0,00	1,00	1,00
14	0,67	0,33	0,00	1,00
15	1,00	0,00	0,00	1,00
16	0,33	0,00	0,67	-1,00
17	0,67	0,00	0,33	-1,00
18	0,33	0,33	0,33	-1,00
19	0,67	0,33	0,00	-1,00
20	0,33	0,33	0,33	1,00
21	0,33	0,67	0,00	-1,00
22	0,33	0,00	0,67	1,00
23	0,33	0,33	0,33	1,00
24	0,67	0,00	0,33	1,00

Fonte: Autoria própria

A metodologia empregada nos ensaios foi semelhante à utilizada nos testes com variação de pH, nesta etapa, a polpa foi previamente ajustada para pH 9.

Após o ajuste do pH=9, os reagentes são adicionados conforme as condições estabelecidas para cada ensaio (Quadro 1). Em seguida, realiza-se a homogeneização da polpa e dos reagentes. Imediatamente após a mistura, iniciou-se a cronometragem do ensaio, sendo registradas as posições da interface de sedimentação ao longo do processo, em intervalos de tempo em segundos predeterminados (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720, 780, 840, 900, 960, 1020, 1080, 1140, 1200,

1260, 1320, 1380, 1440, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300 e 3600).

3.5 Tratamento e Análise dos Dados

O desempenho dos reagentes empregados nos ensaios de sedimentação foi avaliado por meio de dois parâmetros de controle: a velocidade de sedimentação e a turbidez do sobrenadante.

Inicialmente, os dados de distância medidos na fita, em seguida, foi inserido, em uma coluna adicional, o tempo correspondente a cada posição da interface. A partir desses dados, foram elaboradas quadros contendo os valores de deslocamento da interface sólido-líquido em função do tempo, o que possibilitou a construção de gráficos representando a variação da altura da interface ao longo do processo de sedimentação.

A velocidade de sedimentação foi determinada a partir da razão entre a distância percorrida pela interface anotado na fita e o tempo correspondente, conforme a equação 3.

$$V=d/t \qquad (3)$$

onde:

- V é a velocidade de sedimentação,
- D é a distância percorrida pela interface,
- t é o tempo (s).

É importante ressaltar que a velocidade de sedimentação foi determinada a partir do trecho linear da curva de decaimento da interface sólido-líquido em função do tempo. Nesse intervalo, a inclinação da curva permanece aproximadamente constante, caracterizando um regime de sedimentação uniforme. Assim, foi considerado o último ponto pertencente ao trecho linear antes da mudança de inclinação da curva, permitindo a determinação da velocidade de sedimentação por meio do coeficiente angular da reta.

Por sua vez, a turbidez do sobrenadante foi utilizada como indicador da eficiência de clarificação, sendo determinada após uma hora do início do ensaio, quando o sistema apresentava estabilidade suficiente para a realização das medições.

A avaliação da turbidez foi realizada com o objetivo de comparar a qualidade do sobrenadante obtido sob diferentes condições experimentais, incluindo as variações de pH e as diferentes dosagens dos reagentes avaliados. Para isso, utilizou-se um turbidímetro previamente calibrado conforme as recomendações do fabricante (Figura 20).

Figura 20 - Turbidimetro



Fonte:Autoria própria

Inicialmente, o equipamento foi ligado e submetido ao procedimento de calibração. Após uma hora do início do ensaio de sedimentação, uma alíquota do sobrenadante foi cuidadosamente coletada, evitando-se qualquer ressuspensão das partículas sedimentadas. Em seguida, a amostra foi transferida para a cubeta específica do equipamento, previamente limpa e seca, a fim de evitar interferências nas leituras. A cubeta foi então vedada e posicionada no compartimento de leitura do turbidímetro, sendo a medição realizada por meio do acionamento da função de leitura ("Read"). O valor de turbidez foi registrado após a estabilização da leitura. Os resultados foram expressos em unidades nefelométricas de turbidez (NTU) e utilizados para comparar a eficiência de clarificação entre os diferentes ensaios.

Dessa forma, a análise conjunta da velocidade de sedimentação e da turbidez permitiu avaliar o desempenho dos reagentes quanto à rapidez da separação sólido-líquido e à qualidade do clarificado obtido, fornecendo uma base consistente para a comparação das condições experimentais estudadas.

Para determinar as combinações de reagentes utilizadas nos testes, foram considerados os resultados obtidos individualmente para cada reagente. Com base nesses dados, foi realizada uma análise no software Minitab, visando identificar as combinações mais promissoras para otimizar o desempenho do processo.

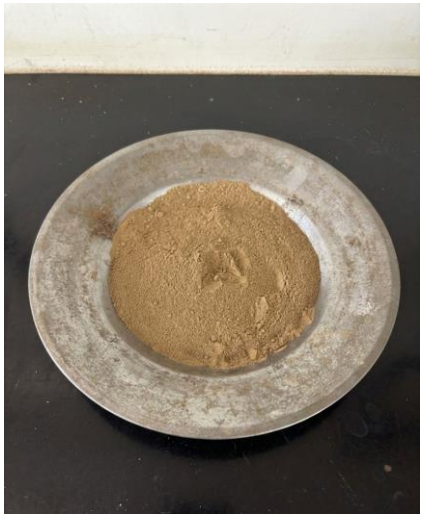
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados.

4.1 Caracterização do rejeito

Para a realização dos testes, utilizou-se o transbordo (*overflow*) da etapa de deslamagem do hidrociclone, de rejeito fino de minério fosfático. O pH natural da polpa é 7,33. A Figura 21 apresenta o material de rejeito empregado nos testes de sedimentação e a Figura 22 mostra o resultado da distribuição granulométrica.

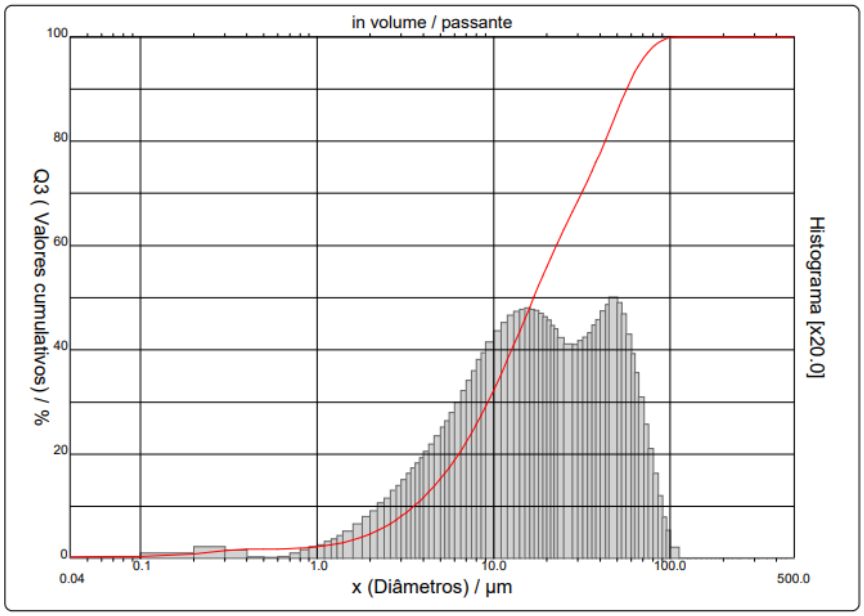
Figura 21-Rejeito fosfático fino (*Overflow* da deslamagem)



Fonte: Autoria própria

O valor de D_{50} foi igual a 16,83 µm, indicando que metade das partículas possui tamanho inferior a aproximadamente 17 µm. Em rejeitos minerais, especialmente fosfáticos, isso caracteriza um material bastante fino, com elevada área superficial específica. Isso indica baixa velocidade de sedimentação natural, tendência à formação de suspensões estáveis, maior consumo de floculantes, maior retenção de água no *underflow* do espessador (WILLS, 2016). O D_{10} = 3,53 µm mostra que cerca de 10% das partículas estão abaixo de 3,5 µm. Essas partículas devem possuir alta carga superficial, permanecendo em suspensão por longos períodos, dificultando a clarificação da água.

Figura 22-Gráfico da distribuição granulométrica



A respectiva lama obtém os seguintes teores:

- P_2O_5 3,22%
- Fe_2O_3 17,69%
- MgO 7,12%
- CaO 7,89%
- Al_2O_3 6,69%
- SiO_2 39,81%
- TiO_2 3,47%
- MnO 0,31%
- K_2O 1,57%

Os resultados do teste de picnometria indicaram uma densidade de 2,865 g/cm³, com o desvio padrão de 0,0035 g/cm³.Os valores de densidade determinados encontram-se apresentados no quadro 2.

Quadro 2-Resultado da densidade do rejeito fosfático

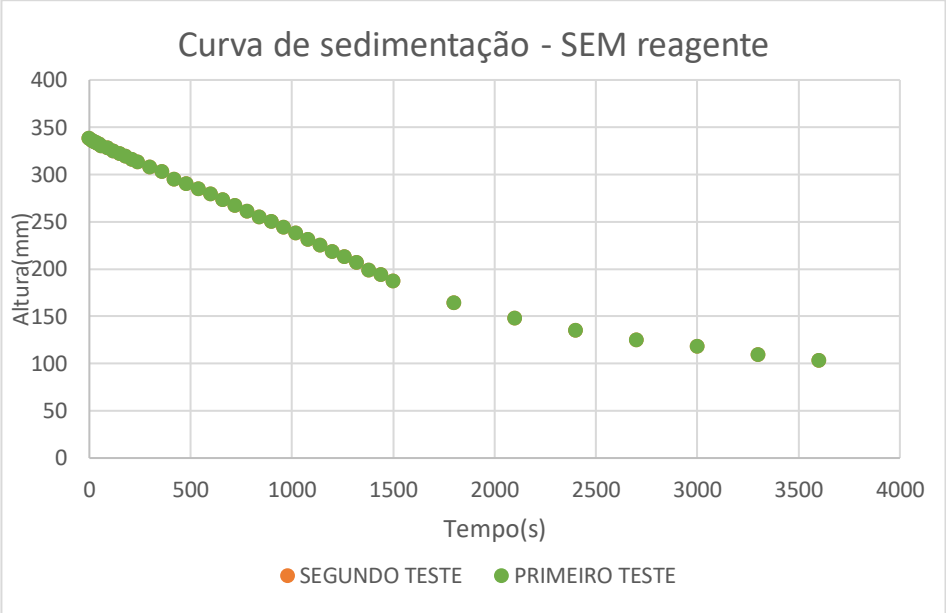
	1° teste	2° teste	3° teste	Média
Densidade (g/cm³)	2,866	2,869	2,862	2,865
Desvio Padrão	0,0035			

Fonte: Autoria própria

4.2 Teste de proveta com pH natural- Sem reagentes

Inicialmente, foram realizados dois ensaios de sedimentação com a polpa em pH natural (7,33) e na ausência de reagentes, com o objetivo de estabelecer uma condição de referência. O resultado obtido desse teste se encontra no Gráfico 1.

Gráfico 1-Curva de sedimentação (pH natural-SEM reagentes)



Fonte: Autoria própria

A curva de sedimentação dos dois testes realizados sem a adição de reagentes apresentou comportamento semelhante entre si como mostrado no gráfico 1, além de estar de acordo com o esperado. A velocidade média de sedimentação obtida foi de 0,3696 m/h, conforme apresentado no quadro 3.

Quadro 3-Velocidade de sedimentação das partículas no teste de pH natural e sem reagentes

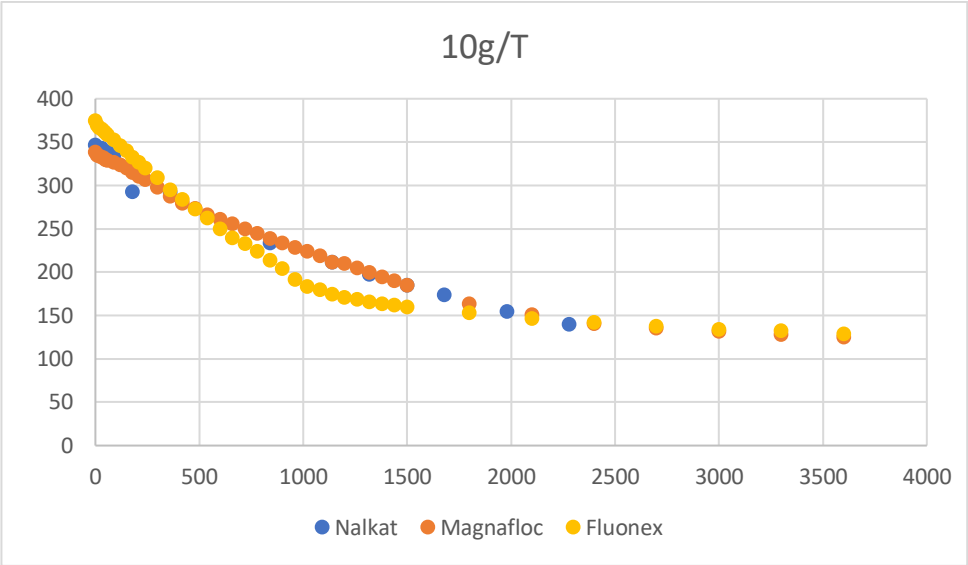
EXPERIMENTO	PRIMEIRO TESTE	SEGUNDO TESTE	MÉDIA
Velocidade(m/h)	0,3768	0,3624	0,3696

Fonte: Autoria própria

4.3 Teste de proveta com pH natural - Variando concentrações de reagentes

Os testes conduzidos em pH natural, com a adição de reagentes nas concentrações de 10 g/t, 30 g/t e 50 g/t, apresentaram os resultados mostrados nos Gráficos 2, 3 e 4, respectivamente.

Gráfico 2-Curva de sedimentação com concentração de 10g/t



Fonte: Autoria própria

Para a dosagem de 10 g/t, observou-se uma velocidade de sedimentação semelhante à obtida no ensaio sem adição de reagentes em pH natural, não havendo variações significativas, como evidenciado no Quadro 4. Apenas com o uso do floculante Flonex foi identificado um leve aumento na velocidade de sedimentação, porém sem diferença expressiva.

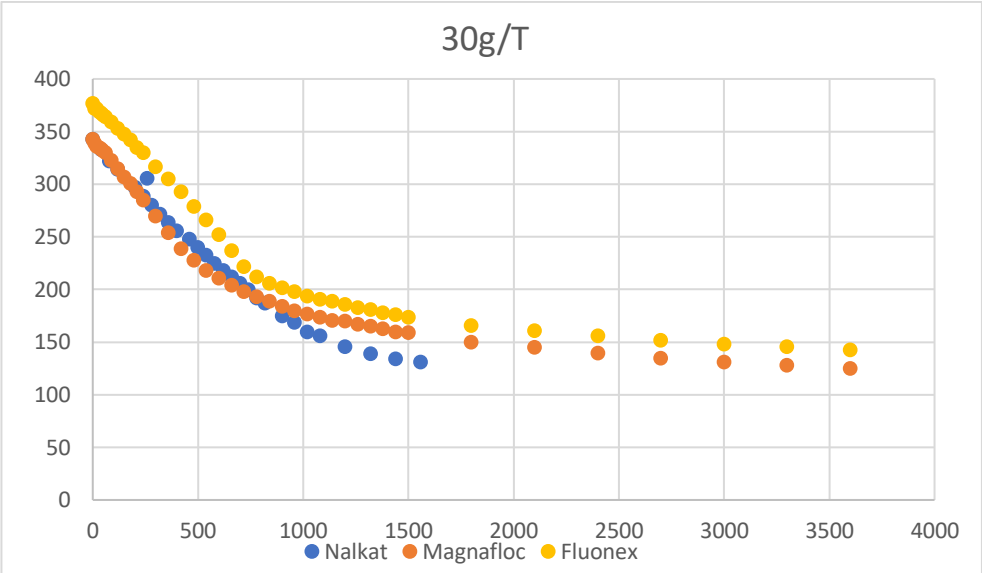
Quadro 4-Velocidade de sedimentação das partículas do teste de concentração de 10g/t

EXPERIMENTO 10g/t	Nalkat	Magnafloc	Flonex
Velocidade (m/h)	0,3707	0,3696	0,7160

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos para a concentração de 30 g/t indicam, a partir da curva de sedimentação ilustrada no gráfico 3, um aumento significativo na velocidade de sedimentação em relação à concentração de 10 g/t, com o valor 0,71 para flonex na dosagem 10g/t é maior que o valor obtido para Nalkat em 30g/t. Ressalta-se que não houve variação do pH durante os testes, mantendo-se pH natural.

Gráfico 3-Curva de sedimentação com concentração de 30g/t



Fonte: Autoria própria

Conforme observado no Quadro 5, os floculantes apresentaram as maiores velocidades de sedimentação, com destaque para o Magnafloc, que obteve o melhor desempenho. Em contrapartida, o coagulante Nalkat apresentou a menor velocidade de sedimentação entre os reagentes avaliados.

O menor desempenho do coagulante em relação aos floculantes pode ser explicado pelo seu mecanismo de atuação no processo de sedimentação.Os coagulantes atuam principalmente na neutralização das cargas superficiais das partículas, reduzindo a repulsão eletrostática entre elas. Isso promove a formação de microflocos, que ainda são relativamente pequenos e densificam pouco o sistema, resultando em velocidades de sedimentação mais baixas. Por outro lado, os floculantes (geralmente polímeros de alto peso molecular) atuam por mecanismos como a “ponteamento” (*bridging*), ligando várias partículas entre si e formando flocos maiores e mais estruturados. Esses flocos apresentam maior tamanho e massa, o que favorece a sedimentação mais rápida devido ao aumento da força gravitacional atuante. Além disso, flocos maiores tendem a aprisionar menos água em sua estrutura quando comparados aos agregados formados apenas por coagulação, contribuindo para uma maior eficiência no adensamento.

Quadro 5-Velocidade de sedimentação das partículas do teste de concentração de 30g/t

EXPERIMENTO 30g/t	NALKAT	MAGNAFLOC	FLONEX
Velocidade (m/h)	0,6848	0,8625	0,7750

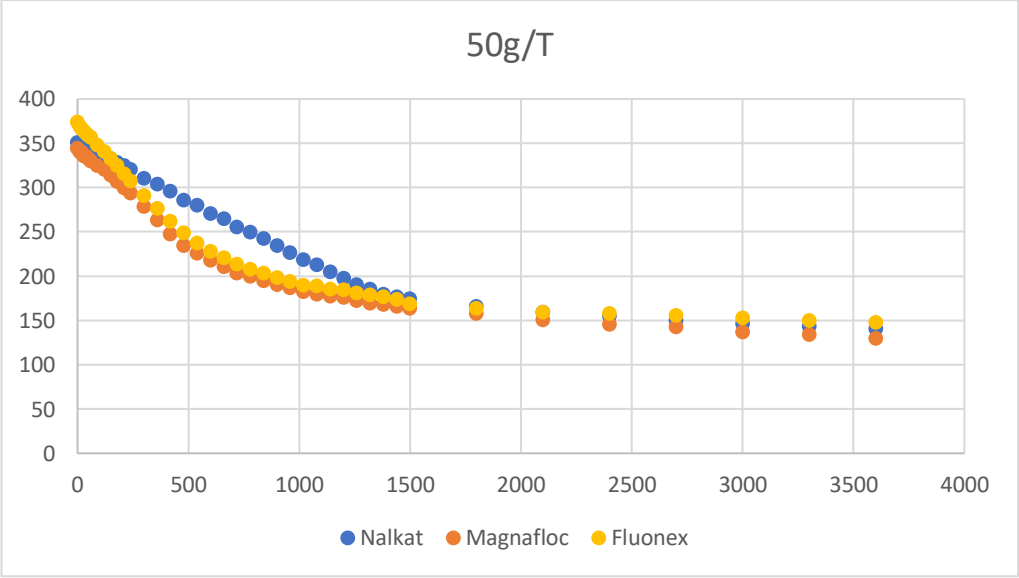
Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos para a concentração de 50 g/t indicaram uma redução na velocidade de sedimentação em comparação à concentração de 30 g/t, apenas o floculante Flonex apresentou um leve aumento na velocidade de sedimentação, como mostrado no Gráfico 4 e Quadro 6.

Esse comportamento pode ser associado ao fenômeno de superdosagem de reagentes, especialmente no caso de floculantes, em que o excesso de polímero pode causar reestabilização das partículas ou formação de flocos menos eficientes (GREGORY, 2005).

Dessa forma, conclui-se que a concentração de 50 g/t não é viável, uma vez que implica maior consumo de reagentes sem proporcionar aumento expressivo na velocidade de sedimentação das partículas.

Gráfico 4-Curva de sedimentação com concentração de 50g/t



Fonte: Autoria própria

Quadro 6-Velocidade de sedimentação das partículas do teste de concentração de 50g/t

EXPERIMENTO 50g/t	NALKAT	MAGNAFLOC	FLONEX
Velocidade (m/h)	0,4590	0,8251	0,9375

Fonte: Autoria própria

O Quadro 7 apresenta os valores de turbidez do clarificado obtidos para as diferentes concentrações de reagentes avaliadas. Observa-se que o ensaio sem adição de reagentes resultou em turbidez superior a 1000 NTU, evidenciando a baixa eficiência de clarificação do sistema em pH natural e sem condicionamento químico. Com a adição dos reagentes, verifica-se uma redução significativa da turbidez, indicando melhoria no processo de separação sólido-líquido. Na concentração de 10 g/t, os valores ainda se mantêm relativamente elevados, com destaque para o Magnafloc (836 NTU), enquanto o Nalkat (130 NTU) e o Flonex (335 NTU) apresentaram melhor desempenho.

Quadro 7-Turbidez do clarificado nas condições variadas de concentração de reagentes

Turbidez	**Nalkat**	**Magnafloc**	**Flonex**
10g/t	130	836	335
30g/t	186	259	94
50g/t	117	223	86
Sem reagente	>1000		

Fonte: Autoria própria

Para a concentração de 30 g/t, observa-se uma redução expressiva da turbidez para todos os reagentes, sendo o Flonex o mais eficiente (94 NTU), seguido pelo Nalco (186 NTU) e pelo Magnafloc (259 NTU). Esse comportamento indica uma melhoria na formação dos flocos, refletindo diretamente na qualidade do clarificado.

Na concentração de 50 g/t, os valores de turbidez apresentaram apenas uma pequena redução em relação à condição anterior, com 223 NTU para o Magnafloc, 117 NTU para o Nalco e 86 NTU para o Flonex. Esse resultado evidencia um ganho pouco expressivo na clarificação com o aumento da dosagem, sugerindo possível saturação do sistema ou efeito de superdosagem.

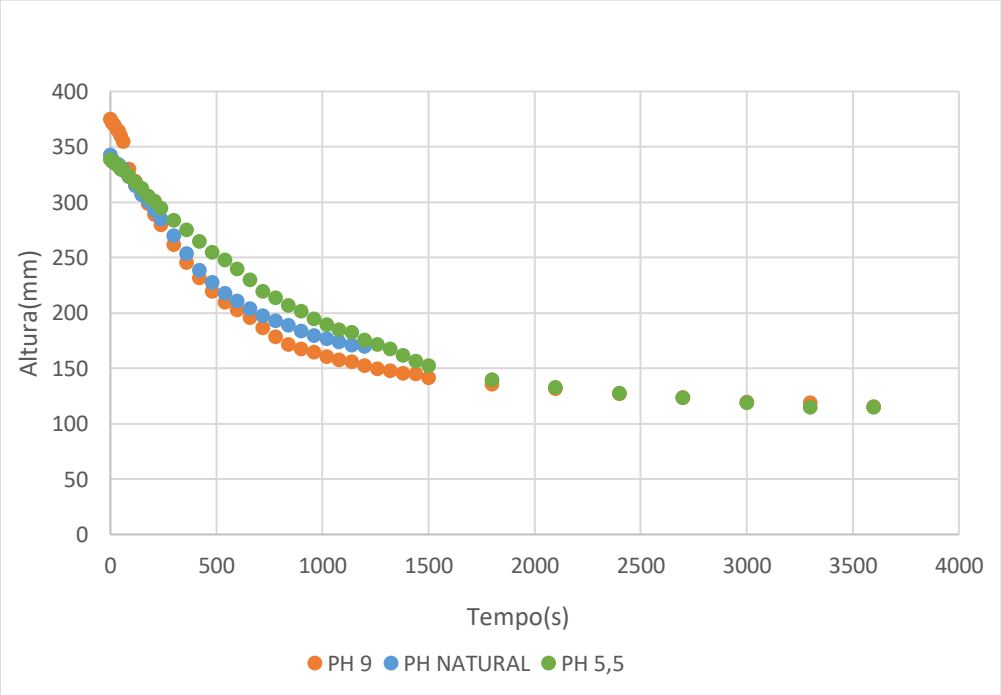
Dessa forma, com base nos dados apresentados no quadro 7, conclui-se que a concentração de 30 g/t representa a condição mais adequada, pois proporciona significativa redução da turbidez com menor consumo de reagentes. Além disso, o Flonex se destaca como o reagente mais eficiente para a clarificação do sistema estudado.

4.4 Variando pH- Concentração de 30g/t de reagentes

4.4.1 Magnafloc

No ensaio em que houve a variação do pH utilizando o Magnafloc, conforme apresentado no Gráfico 5 e Quadro 8, observa-se que a maior velocidade de sedimentação foi obtida na condição de pH=9. Esse resultado indica que, em meio alcalino, o desempenho do floculante foi mais eficiente, promovendo maior agregação das partículas e, consequentemente, maior velocidade de sedimentação.

Gráfico 5-Curva de sedimentação Magnafloc-Variando pH



Fonte: Autoria própria

O quadro 8 apresenta os resultados obtidos, evidenciando que o meio alcalino foi o que proporcionou a maior velocidade de sedimentação quando comparado ao pH natural e ao pH ácido(<7). Por outro lado, o meio ácido apresentou desempenho inferior, com velocidade de sedimentação menor que a observada no pH natural da polpa.

Quadro 8-velocidades de sedimentação Magnafloc- Variando o pH

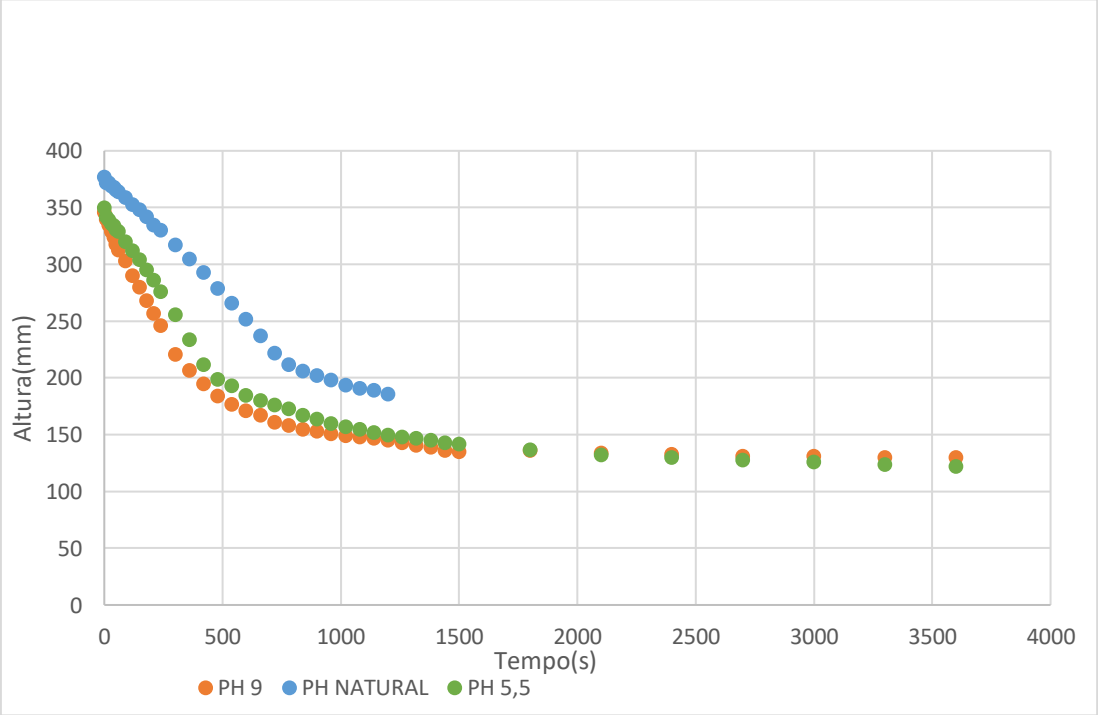
EXPERIMENTO Magnafloc	NATURAL=7,33	pH=5,5	pH=9
VELOCIDADE(m/h)	0,8333	0,5945	1,032

Fonte: Autoria própria

4.4.2 Flonex

O floculante Flonex apresentou comportamento semelhante ao observado para o Magnafloc. Conforme indicado no Gráfico 6 e Quadro 9, sua maior velocidade de sedimentação também foi registrada em pH alcalino. Diferentemente do comportamento observado para o Magnafloc, o Flonex apresentou maior velocidade de sedimentação em meio ácido quando comparado ao pH natural.

Gráfico 6-Curva de sedimentação Flonex-Variando pH



Fonte: Autoria própria

Quadro 9- Velocidades de sedimentação Flonex-Variando pH

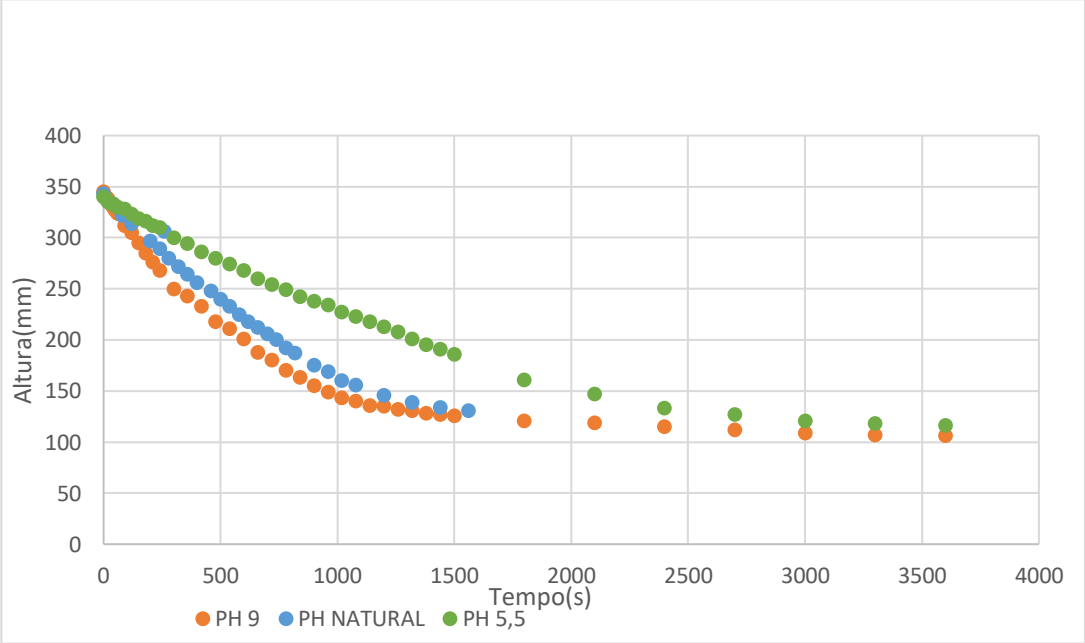
EXPERIMENTO Flonex	NATURAL=7,33	pH=5,5	pH=9
VELOCIDADE(m/h)	0,7751	1,1828	1,3900

Fonte: Autoria própria

4.4.3 Nalkat

De acordo com o gráfico 7 e quadro 10, a maior velocidade de sedimentação foi obtida em pH alcalino(>7), comportamento semelhante ao verificado para os floculantes Magnafloc e Flonex. Além disso, assim como observado para o Magnafloc, em meio ácido a velocidade de sedimentação foi inferior à registrada no pH natural.

Gráfico 7-Curva de sedimentação Nalkat-Variando pH



Fonte: Autoria própria

Quadro 10- Velocidades de sedimentação Nalkat-Variando pH

EXPERIMENTO Nalkat	NATURAL=7,33	pH=5,5	pH=9
VELOCIDADE(m/h)	0,6848	0,3696	0,8076

Fonte: Autoria própria

Após a medição da turbidez da água clarificada após 1 hora de sedimentação, obtiveram-se os resultados apresentados no quadro 11. Observa-se que, em meio ácido, a água apresentou menor turbidez quando comparada à condição de pH=9, indicando maior eficiência na clarificação. Resultados semelhantes foram observados por Bergani et al. (2025), ao investigarem a floculação de rejeitos fosfáticos finos. Os autores verificaram que a eficiência da clarificação depende diretamente da combinação entre o tipo de floculante e o pH do meio, sendo possível alcançar valores de turbidez inferiores a 5 NTU quando as condições operacionais são adequadamente ajustadas. Além disso, o estudo destaca que a interação entre o polímero e a superfície das partículas é fortemente influenciada pelo pH, afetando simultaneamente a velocidade de sedimentação e a qualidade da água recuperada.

Destaca-se que o floculante Flonex apresentou o melhor desempenho, alcançando os menores valores de turbidez na condição de pH ácido(<7), comparado com os outros reagentes. De modo geral, os menores valores de turbidez foram obtidos em meio ácido para todos os testes realizados.

Quadro 11- Turbidez- Variando pH

Turbidez	**Magnafloc**	**Nalkat**	**Flonex**
pH 9	>1000	>1000	367
pH 5,5	105	122	2,67
pH natural	259	186	94

Fonte: Autoria própria

4.5 Combinação dos reagentes

Ao analisar o Quadro 12, observa-se que todos os testes realizados com combinações de reagentes apresentaram velocidades de sedimentação superiores às obtidas nos ensaios com reagentes individuais. Esse resultado sugere que a combinação dos reagentes promoveu maior eficiência na agregação das partículas, resultando na formação de flocos maiores e mais estáveis, favorecendo o processo de separação sólido-líquido.

Quadro 12- Resultados da sedimentação com reagentes combinados

	Nalkat	Magnafloc	Fluonex	Amido	turbidez	Velocidade(m/h)
Teste 1	0,33	0,33	0,33	1,00	334	1,3285
Teste 2	1,00	0,00	0,00	-1,00	951	0,8400
Teste 3	0,33	0,67	0,00	1,00	440	1,0650
Teste 4	0,00	0,33	0,67	1,00	711	1,3700
Teste 5	0,00	0,00	1,00	-1,00	857	1,5240
Teste 6	0,33	0,33	0,33	-1,00	564	1,4600
Teste 7	0,00	0,67	0,33	1,00	481	2,1300
Teste 8	0,00	0,33	0,67	-1,00	654	2,0743
Teste 9	0,00	1,00	0,00	1,00	1000	1,9800
Teste 10	0,00	1,00	0,00	-1,00	1000	1,1100
Teste 11	0,00	0,67	0,33	-1,00	493	1,2000
Teste 12	0,33	0,33	0,33	-1,00	1000	1,5000
Teste 13	0,00	0,00	1,00	1,00	609	1,1700
Teste 14	0,67	0,33	0,00	1,00	884	2,0880
Teste 15	1,00	0,00	0,00	1,00	625	1,7000
Teste 16	0,33	0,00	0,67	-1,00	1000	1,3500
Teste 17	0,67	0,00	0,33	-1,00	1000	1,88400
Teste 18	0,33	0,33	0,33	-1,00	1000	1,4500
Teste 19	0,67	0,33	0,00	-1,00	400	2,1480
Teste 20	0,33	0,33	0,33	1,00	1000	1,3200
Teste 21	0,33	0,67	0,00	-1,00	1000	0,7900
Teste 22	0,33	0,00	0,67	1,00	868	1,2257
Teste 23	0,33	0,33	0,33	1,00	589	1,4900
Teste 24	0,67	0,00	0,33	1,00	672	1,6440

Fonte: Autoria própria

Ao verificar os resultados dos ensaios, observa-se que o Teste 19 apresentou o melhor desempenho, combinando baixa turbidez do clarificado e elevada velocidade de sedimentação, atingindo 2,15 m/h. O Teste 19 correspondeu à condição em que foi utilizada a combinação de apenas um coagulante e um floculante, com predominância do coagulante na composição da dosagem. A maior proporção de coagulante provavelmente favoreceu a desestabilização das partículas e a neutralização das cargas superficiais, enquanto o floculante atuou promovendo a formação de pontes poliméricas e a geração de flocos maiores, resultando um melhor desempenho. A Figura 24 apresenta o resultado obtido no Teste 19 após o experimento.

Figura 24- Resultado do teste com melhor desempenho(19)



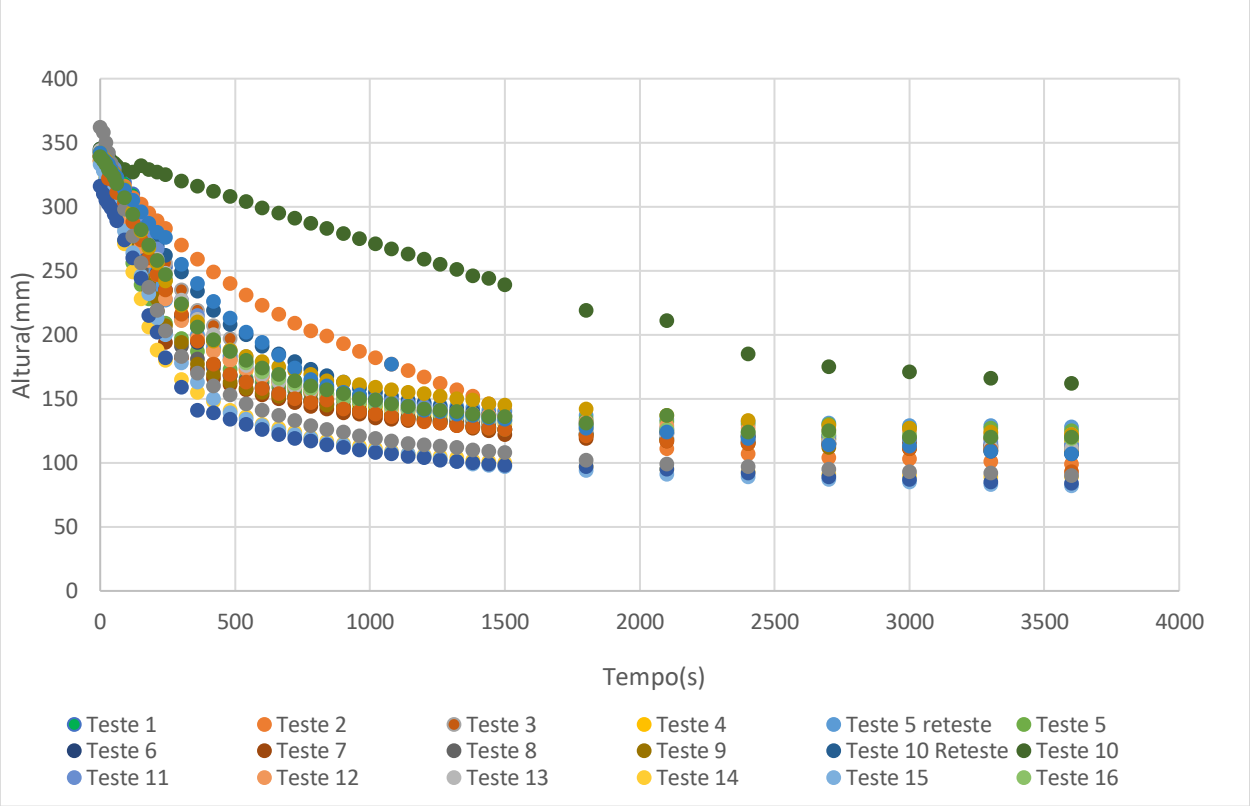
Fonte: Autoria própria

O Teste 7 apresentou o segundo melhor desempenho entre os ensaios realizados. Entre os testes que utilizaram amido de mandioca, esse foi o que apresentou os melhores resultados, com desempenho bastante semelhante ao do ensaio do teste 19. O Gráfico 8 apresenta as curvas de sedimentação de todos os testes realizados. Observa-se que os testes 7, 8, 14 e 19 apresentou o melhor comportamento em relação a velocidade de sedimentação.

O Gráfico 9 apresenta os resultados dos melhores ensaios realizados. Observa-se que o teste 19 apresentou a maior declividade nos tempos iniciais, indicando a maior velocidade de sedimentação entre os ensaios avaliados. O teste 7 apresentou uma velocidade de sedimentação bastante próxima à observada no teste 19; entretanto, a eficiência na clarificação da água foi inferior quando comparada ao teste 19.

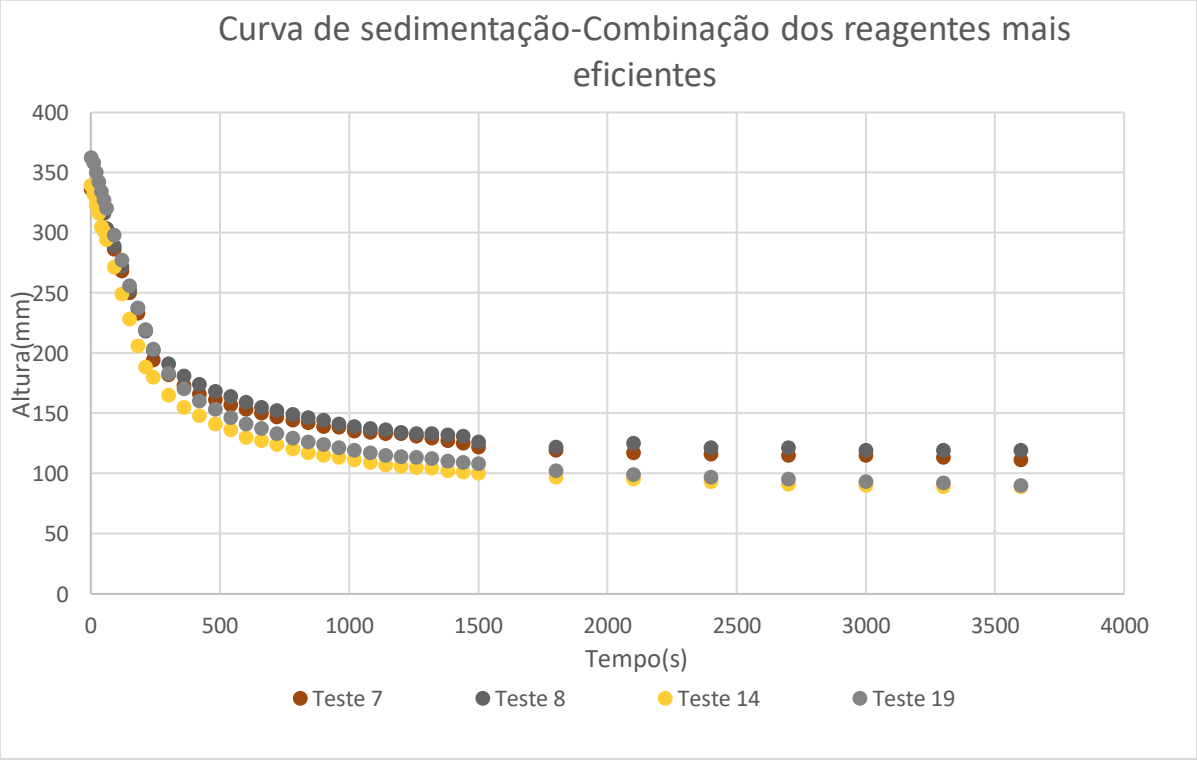
Entretanto, no Teste 7 foram utilizados três reagentes — Magnafloc, Flonex e amido de mandioca —, o que torna sua aplicação mais complexa, uma vez que demanda uma etapa adicional de preparo, maior tempo de execução dos ensaios e maior consumo de reagentes quando comparado às demais condições experimentais.

Gráfico 8- Resultado da curva de sedimentação com reagentes combinados



Fonte: Autoria própria

Gráfico 9- Curva de sedimentação com reagentes combinados mais eficientes

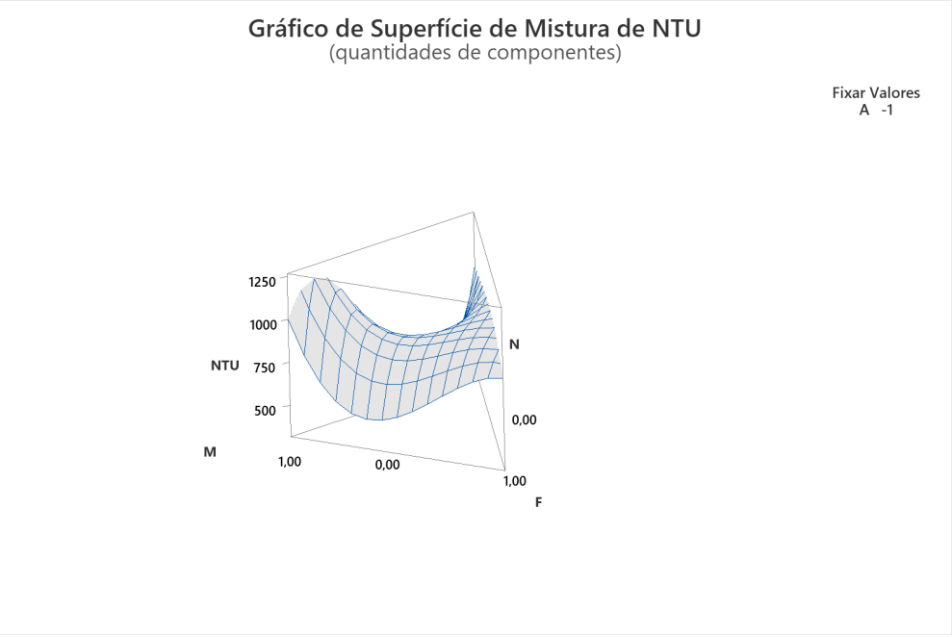


Fonte: Autoria própria

O experimento foi conduzido utilizando um planejamento de misturas (Simplex Lattice) com três componentes Nalkat (N),Magnafloc (M),Flonex (F) e uma variável de processo (amido) em dois níveis (-1 e +1). O modelo ajustado foi um modelo cúbico completo, adequado para captar interações entre os três reagentes com objetivo de minimizar a turbidez. O valor previsto mínimo de turbidez é aproximadamente 188 NTU, a desejabilidade é igual a 1,0, indicando que o software encontrará uma solução considerada ótima dentro das restrições do experimento.

O gráfico 10 apresenta a superfície de resposta da turbidez (NTU) obtida a partir do planejamento de misturas, mantendo a variável amido fixa no nível A = -1. Observa-se que a superfície apresenta um comportamento não linear, com a formação de uma região de vale correspondente aos menores valores de turbidez. Esse resultado evidencia que a eficiência da clarificação depende da proporção entre os reagentes, indicando a existência de interação entre os componentes da mistura. As regiões mais elevadas da superfície correspondem aos maiores valores de turbidez, enquanto a região de menor elevação representa a condição de melhor desempenho do processo. Dessa forma, a superfície de resposta demonstra que a otimização da clarificação não é alcançada pela utilização isolada de um único reagente, mas sim pela combinação adequada entre Nalkat, Magnafloc e Flonex.

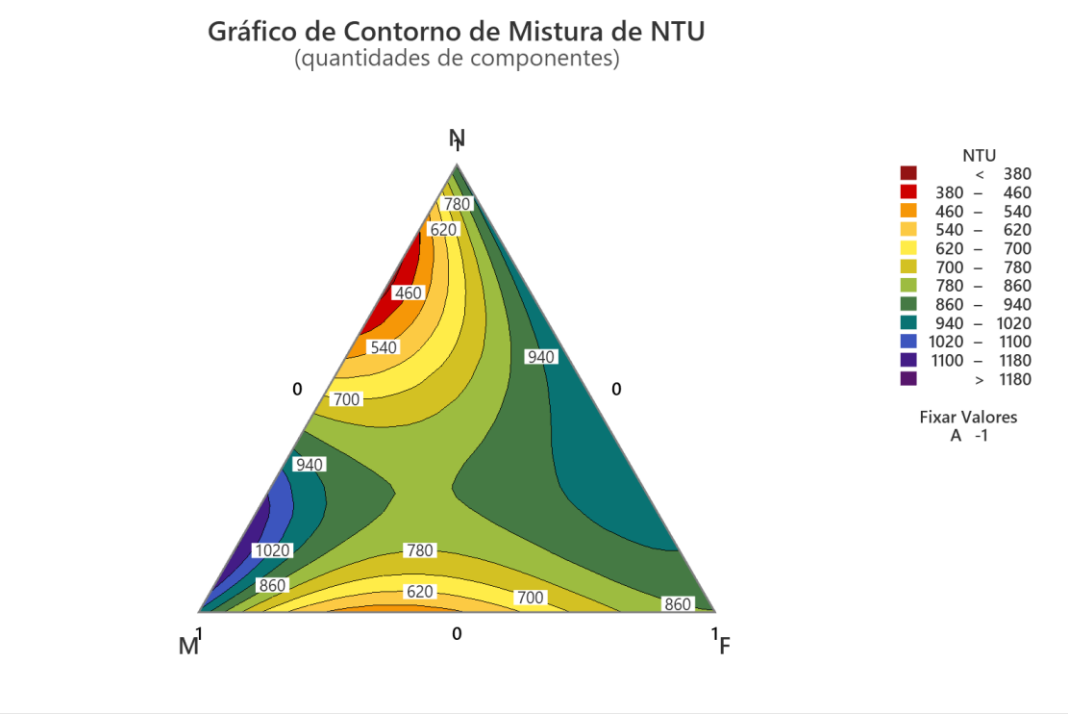
Gráfico 10- Gráfico de superfície de mistura de NTU



Fonte: Autoria própria

Ao analisar a curva de contorno da turbidez é possível observar que a turbidez varia conforme a proporção dos três componentes. Dessa maneira, o Gráfico 11, obtido por meio do planejamento experimental de misturas. As diferentes cores representam os valores previstos de turbidez em função das proporções de Nalkat (N), Magnafloc (M) e Flonex (F), mantendo-se a variável amido fixada no nível -1. Observa-se que os menores valores de turbidez concentram-se na região próxima ao vértice correspondente ao Nalkat, indicando maior eficiência de clarificação quando esse reagente está presente em maiores proporções. Em contrapartida, a região próxima ao Magnafloc apresentou os maiores valores de turbidez, sugerindo menor eficiência nas condições avaliadas. Além disso, as curvas de contorno evidenciam que a resposta varia de forma não linear ao longo do diagrama, demonstrando a existência de interação entre os reagentes e indicando que o desempenho da clarificação depende da combinação entre os componentes da mistura.

Gráfico 11-Gráfico de contorno da mistura para a resposta turbidez (NTU)

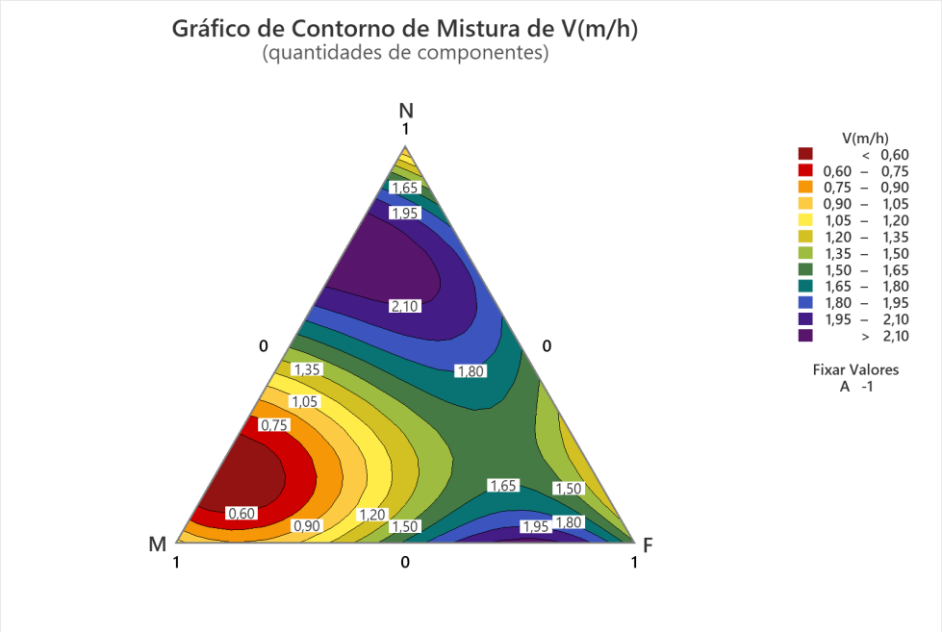


Fonte: Autoria própria

Ao analisar os gráficos 12 e 13, o de contorno da velocidade de sedimentação (V, m/h), é obtido a partir do planejamento de misturas, mantendo-se a variável amido fixa no nível A = -1. As curvas representam a variação da velocidade de sedimentação

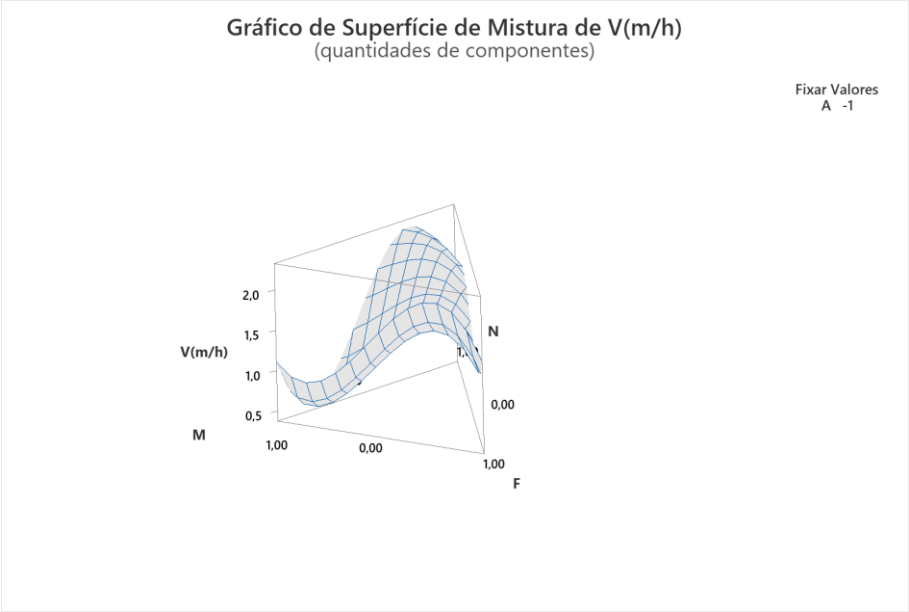
em função das proporções de Nalkat (N), Magnafloc (M) e Flonex (F). Observa-se que os maiores valores de velocidade concentram-se na região próxima ao vértice correspondente ao Nalkat, alcançando valores superiores a 2,10 m/h, enquanto os menores valores foram obtidos nas proximidades do vértice do Magnafloc, com velocidades inferiores a 0,60 m/h. A região correspondente ao Flonex apresentou valores intermediários de velocidade, entre aproximadamente 1,50 e 1,95 m/h. O formato das curvas de contorno demonstra que a resposta não apresenta comportamento linear, evidenciando a existência de interação entre os reagentes e indicando que a velocidade de sedimentação depende da combinação entre os componentes da mistura, e não apenas da ação isolada de cada um deles.

Gráfico 12-Gráfico de contorno da mistura para a resposta de velocidade(m/h)



Fonte: Autoria própria

Gráfico 13-Gráfico de superfície de mistura de velocidade(m/h)



Fonte: Autoria própria

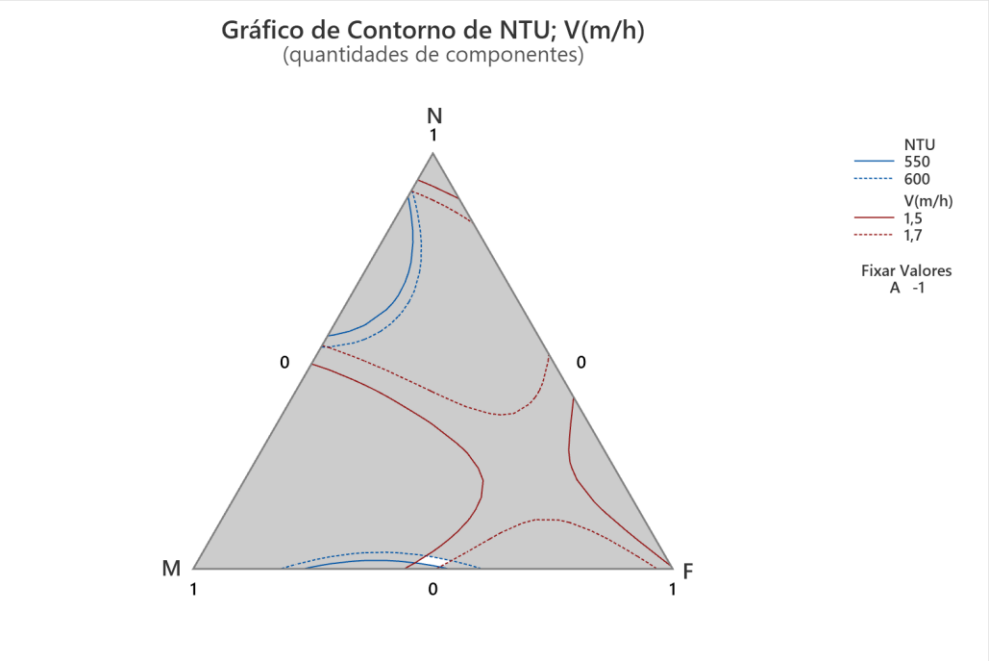
O gráfico 14 apresenta o gráfico de contorno sobreposto das respostas turbidez (NTU) e velocidade de sedimentação (V, m/h), obtido a partir do planejamento de misturas, mantendo a variável amido fixa no nível A = -1. As linhas azuis representam os contornos de turbidez para os valores de 550 e 600 NTU, enquanto as linhas vermelhas representam os contornos de velocidade de sedimentação para 1,5 e 1,7 m/h.

Observa-se que as linhas de ambas as respostas se distribuem de maneira distinta ao longo do diagrama ternário, evidenciando que a combinação dos reagentes influencia simultaneamente a qualidade da clarificação e a velocidade de sedimentação. A ausência de coincidência completa entre os contornos demonstra que as condições que favorecem a obtenção da menor turbidez não correspondem necessariamente às mesmas condições que proporcionam a maior velocidade de sedimentação.

Essa diferença caracteriza um conflito entre as respostas, comum em processos de otimização multirresposta, no qual a melhoria de uma variável pode resultar na redução do desempenho da outra. Dessa forma, torna-se necessária a busca por uma composição intermediária que proporcione um equilíbrio entre ambas as respostas.

O gráfico também evidencia que as regiões próximas ao vértice correspondente ao Nalkat concentram simultaneamente contornos associados a menores valores de turbidez e maiores velocidades de sedimentação, indicando que esse reagente exerceu influência significativa sobre o desempenho do processo nas condições avaliadas. Entretanto, a definição da melhor composição deve considerar simultaneamente ambas as respostas por meio da função de desejabilidade, apresentada na etapa de otimização do planejamento experimental.

Gráfico 14-Gráfico de contorno de NTU e velocidade(m/h)



Fonte: Autoria própria

Com isso, é possível observar que a melhor mistura não deve ser escolhida apenas pela menor turbidez, também não deve ser escolhida apenas pela maior velocidade. É necessário encontrar uma composição que apresente baixa turbidez e alta velocidade ao mesmo tempo. A solução ótima final é obtida pela função de desejabilidade do Minitab, que combina matematicamente as duas respostas para indicar a composição mais adequada foi 50% Magnafloc + 50% Flonex sem utilização de Nalkat e amido de mandioca. A melhor composição nos valores codificados foi:

- Nalkat = 0
- Magnafloc = 0,50
- Flonex = 0,50
- Amido = -1

5. CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar, de forma sistemática, a influência de diferentes reagentes — Magnafloc 351, Flonex 953, Nalkat 7607/Nalco e fécula de mandioca — bem como das variáveis operacionais, especialmente concentração e pH, no processo de sedimentação de partículas finas provenientes de rejeitos fosfáticos.

Os resultados obtidos evidenciaram que a adição de reagentes desempenha papel fundamental na melhoria da separação sólido-líquido, promovendo aumento significativo da velocidade de sedimentação e redução da turbidez do sobrenadante quando comparados aos ensaios realizados sem condicionamento químico. Em relação à dosagem, a concentração de 30 g/t apresentou o melhor desempenho global, estabelecendo um equilíbrio adequado entre eficiência do processo e consumo de reagentes. Em contrapartida, a dosagem de 50 g/t não apresentou ganhos expressivos, indicando possíveis efeitos associados à superdosagem, capazes de comprometer a eficiência da floculação.

Quanto ao desempenho individual dos reagentes, observou-se que os floculantes apresentaram resultados superiores ao coagulante, devido ao mecanismo de atuação baseado na formação de pontes poliméricas, favorecendo a formação de flocos maiores e com maior capacidade de sedimentação. Dentre os reagentes avaliados individualmente, o Flonex 953 destacou-se por apresentar os melhores resultados de clarificação, resultando nos menores valores de turbidez do clarificado e maior velocidade de sedimentação.

A análise da influência do pH revelou comportamentos distintos no processo de sedimentação. Verificou-se que o meio alcalino (pH=9) favoreceu o aumento da velocidade de sedimentação, indicando maior eficiência na agregação das partículas e no crescimento dos flocos. Por outro lado, o meio ácido (pH=5) apresentou melhor desempenho na clarificação do sobrenadante, resultando em menores valores de turbidez. Dessa forma, constatou-se um comportamento inversamente proporcional entre a taxa de sedimentação e a qualidade do clarificado. Portanto, a definição da melhor condição operacional depende do objetivo do processo, sendo necessário estabelecer um equilíbrio entre a velocidade de sedimentação e a eficiência da clarificação.

Nos ensaios envolvendo combinações de reagentes, verificou-se desempenho superior em relação aos testes realizados com reagentes individuais, evidenciando efeito sinérgico entre os mecanismos de coagulação e floculação. O melhor resultado foi obtido no Teste 19, correspondente à combinação entre Magnafloc 351 e Nalkat 7607/Nalco, utilizando uma proporção de aproximadamente 2/3 de coagulante e 1/3 de floculante. Esse ensaio apresentou o melhor desempenho global, alcançando velocidade de sedimentação de 2,148 m/h e turbidez do sobrenadante de 400 NTU.

A otimização do experimento de misturas indicou que a combinação de Magnafloc e Flonex proporcionou o melhor desempenho global de acordo com o sowftore no processo de sedimentação. A solução ótima encontrada pelo Minitab correspondeu à composição contendo 50% de Magnafloc e 50% de Flonex, sem adição de Nalkat e amido de mandioca. Esse resultado evidencia um efeito de sinergia entre os dois floculantes, permitindo simultaneamente a redução da turbidez do sobrenadante e o aumento da velocidade de sedimentação. A análise das superfícies de resposta e dos gráficos de contorno demonstra que a utilização isolada dos reagentes não foi suficiente para alcançar o mesmo desempenho, indicando que a interação entre Magnafloc e Flonex potencializou a eficiência da separação sólido-líquido.

Dessa forma, conclui-se que a seleção da melhor composição não deve ser baseada exclusivamente na obtenção da menor turbidez ou da maior velocidade de sedimentação de forma isolada. O desempenho do processo deve considerar simultaneamente ambas as respostas, buscando uma condição que proporcione elevada eficiência de clarificação, representada por baixos valores de turbidez, e alta velocidade de sedimentação, garantindo maior eficiência na separação sólido-líquido. Além disso, a eficiência do processo está diretamente relacionada à combinação adequada entre tipo/combinação de reagente, dosagem e pH do meio, sendo que a definição das condições operacionais ideais depende do objetivo do processo.

Sugestões de trabalhos futuros a serem desenvolvidos: Por exemplo:

- Avaliação da redução do percentual de sólidos de 15% (estudado neste trabalho para 10%, 5%);
- Dimensionamento do espessador sem a aplicação dos reagentes e com a aplicação dos reagentes (demonstrando a relevância do seu trabalho);
- Estudo de método de superfície de resposta entre a dosagem de coagulante e floculante e comparando a superfície de resposta quando ao uso do tipo de floculante catiônico, aniônico e não iônico;
- Estudo por método de superfície de resposta entre o uso do floculante convencional aniônico + coagulante comparando com o uso do amido de mandioca quando usado como um floculante natural;
- Estudo de método de superfície de reposta entre pH (dois níveis) e o uso do depressor como floculante (dois níveis) e comparar estes gráficos de contorno com o comportamento do floculante aniônico convencional (dois níveis) em dois níveis de pH;
- Redução do percentual de sólidos e o impacto no tamanho do espessados e consumo de coagulante e floculante;
- Estudo da degradação do floculante após a preparação;
- Através de teste fatorial definir o efeito de interação entre o coagulante e o floculante definindo o ponto ótimo de dosagem destes.

6. REFERÊNCIAS

AMARANTE, S. C.; ARAÚJO, A. C.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. ***Cake dewatering of some iron ore industrial products.*** Minerals & Metallurgical Processing, v. 19, n. 3, p. 161–164, 2002.

BALTAR, C. A. M. **Flotação: em nova abordagem**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2021. 537 p.

BASTOS, A. R.; AFONSO, J. C.. **Separação sólido-líquido: centrífugas e papéis de filtro.** Química Nova, São Paulo, v. 38, n. 5, p. 749–756, 2015.

BOLTO, B.; GREGORY, J. ***Organic polyelectrolytes in water treatment. Water Research***, v. 41, n. 11, p. 2301–2324, 2007.

BRAGA, T. S. **Estudo da filtrabilidade de rejeitos finos para empilhamento drenado.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

BRATBY, J. ***Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment***. 2. ed. London: IWA Publishing, 2008.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 3.

COHEN, J. M.; HANNAH, S. A. Coagulation and flocculation. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. ***Water quality and treatment: a handbook of public water supplies***. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1971. cap. 6.

CONCHA, F. ***Solid-liquid separation in the mining industry***. 1. ed. Cham: Springer, 2014. 429 p.

DAVIS, M. L. ***Water and wastewater engineering: design principles and practice.*** New York: McGraw-Hill, 2010.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. **Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas.** Ciência Rural, Santa Maria, v. 39, n. 3, p. 945-954, 2009.

DIAS, C. L. P.; VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C. **Utilização de reagentes auxiliares na filtragem.** REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p. 229-234, 2004.

ELIMELECH, M.; GREGORY, J.; JIA, X.; WILLIAMS, R. A. ***Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation***. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 1998.

FAWELL, P. Solid-liquid separation of clay tailings. In: GRÄFE, M.; KLAUBER, C.; MCFARLANE, A. J.; ROBINSON, D. J. (ed.). ***Clays in the minerals processing value chain***. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. p. 327-380.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G**. Fundamentos de fenômenos de transporte em polpas minerais**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 15, n. 2, p. 121-129, 2018.

FRANKS, G. V.; FAWELL, P. D.; OWEN, A. T.; SWIFT, J. D.; LESTER, D. R. ***Optimising the activity of acrylamide-based polymer solutions used to flocculate mineral processing tailings suspensions: a review.*** Chemical Engineering Research and Design, v. 199, p. 214-237, 2023.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima Artes e Textos, 2001. cap. 3, p. 57-86.

GREGORY, J. ***Fundamentals of flocculation. Critical Reviews in Environmental Control,*** v. 19, n. 3, p. 185-230, 1989.

GREGORY, J. ***Particles in water: properties and processes***. London: IWA Publishing, 2006.

GUIMARÃES, F. A. V. **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais.** 2010. 235 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

HAMRAOUI, L.; BERGANI, A.; ETTOUMI, M.; ABOULAICH, A.; TAHA, Y.; KHALIL, A.; NECULITA, C. M.; BENZAAZOUA, M. ***Towards a Circular Economy in the Mining Industry: Possible Solutions for Water Recovery through Advanced Mineral Tailings Dewatering.*** Minerals, v. 14, n. 3, artigo 319, 2024.

HUNTER, R. J. ***Zeta potential in colloid science: principles and applications.*** London: Academic Press, 1981.

KOSSOFF, D. et al. ***Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation.*** Applied Geochemistry, v. 51, p. 229–245, 2014.

LASKOWSKI, J. S. ***Surface chemistry fundamentals in fine coal processing.*** In: OSBORNE, D. G. (ed.). The Coal Handbook: Towards Cleaner Production. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

LEITE, A. M. C. **Amido natural e modificado como floculante de lama de minério de ferro.** 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

LINS, F. A. F.; ADAMIAN, R. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000. (Série Tecnologia Mineral, n. 78). 29 p.

LIRA, J. R. **Estudo dos parâmetros que influenciam a floculação na sedimentação contínua.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

LIU, D.; EDRAKI, M.; FAWELL, P.; BERRY, L. ***Improved water recovery: A review of clay-rich tailings and saline water interactions***. Powder Technology, v. 364, p. 604–621, 2020.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (ed.). **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

LYKLEMA, J. ***Fundamentals of interface and colloid science: solid-liquid interfaces.*** London: Academic Press, 1988.

LYKLEMA, J. ***The colloidal background of flocculation and dewatering.*** In: MOUDGIL, B. M.; SCHEINER, B. J. (ed.). Flocculation and dewatering. New York: Engineering Foundation, 1989. p. 1-20.

MAIA, L. G. C. **Estudo do processo de eletrocoagulação/floculação aplicado ao polimento de efluente doméstico.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

MARTINS, M.; OLIVEIRA, M. S.; TESTA, F. G. ***Influence of flocculants on the rheological and sedimentation characteristics of iron ore tailings slurries***. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 21, e2814, 2024.

MARTINS, T. G. **Estudo do comportamento reológico e sedimentação de lamas minerais.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

METSO CORPORATION. ***Basics in minerals processing. Helsinki:*** Metso Corporation, 2018.

MOODY, G. M. ***The use of polyacrylamides in mineral processing***. Minerals Engineering, v. 5, n. 3-5, p. 479-492, 1992.

MOURA, A. F. de; SILVA, D. de F. da; SANTOS, G. J. G. dos; SILVA, G. A. da. **O uso de polímeros no tratamento de efluentes.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Química) – Escola Técnica Estadual Prefeito Alberto Feres, Araras, 2024.

OLCAY-B., R. H.; HERNÁNDEZ-O., C. A.; VALADÃO, G. E. S.; CHAVES, A. P. ***Production of mineral paste from phosphate sludge***. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, v. 28, n. 2, p. 335–347, 2020.

OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. **Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011.

OLIVEIRA, J. F.; LUZ, A. B.; LACERDA, M. C**. Flotação e agregação em sistemas coloidais.** Minerals Engineering, v. 17, p. 45–52, 2004.

PAIVA, C. T**. Melhoria da qualidade da água em bacias de decantação localizadas em área de extração de areia.** 2004. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. 125 p.

PAIVA, P. R. P.; GASPAR, J. C.; UGARTE, J. F. O.; MONTE, M. B. M.; LANGSCH, J. E.; BARROS, L. A. F**. Efeito deletério dos íons cálcio e magnésio sobre a flotabilidade de minerais semissolúveis.** In: VII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology e XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Ouro Preto, 2007. Anais... Ouro Preto: UFOP, UFMG e CDTN, 2007. p. 273–279.

PEREIRA, R. L. **Avaliação de reagentes para espessamento de rejeitos finos de minério.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PERES, A. E. C. **Reagentes de processamento mineral.** Belo Horizonte: UFMG, 2005.

QI, Y.; THAPA, K.; HOADLEY, A. F. A. ***Application of filtration aids for improving sludge dewatering propertie***s – A review. Chemical Engineering Journal, v. 171, p. 373–384, 2011.

QI, X. et al. ***Characteristics of fine phosphate slimes and challenges for separation.*** Minerals Engineering, v. 24, n. 10, p. 1134–1142, 2011.

RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. ***Sedimentation and fluidisation:*** Part I. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, v. 32, p. 35–53, 1954.

RICHARDSON, P. F.; CONNELLY, L. J. ***Industrial coagulants and flocculants***. In: SOMASUNDARAN, P.; MOUDGIL, B. M. (ed.). Reagents in mineral technology. New York: Marcel Dekker, 1988. cap. 17, p. 519–558.

SAMPAIO, J. A. (ed.); FRANÇA, S. C. A. (ed.); BRAGA, P. F. A. (ed.). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 570 p.

SILVA, B. E. de S. **Disposição de rejeitos de mineração nos estados de Minas Gerais e Goiás.** 2022. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

SILVA, G. H. F. **Reuso da água do overflow do espessador no processo de flotação de apatita,**2025. (Dissertação de mestrado). Curso de Engenharia Meta de Minas, Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Araxá, 2025.

SLOTTEE, S. ***Tailings Paste Disposal – More Than Water Recovery***. Englewood, CO: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2011.

SOUSA, C. D. ***Estudo da sedimentação de partículas finas em suspensões coloidais.*** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

SOUSA, P. A**. Espessamento de polpas**. 2012. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

STUMM, W.; O'MELIA, C. R. ***Stoichiometry of coagulation.*** Journal American Water Works Association, v. 60, n. 5, p. 514–539, 1968.

SVAROVSKY, L. ***Solid-liquid separation***. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

TÃO, D.; PAREKH, B. K.; HONAKER, R. ***Development and Pilot-Scale Demonstration of Deep Cone Paste Thickening Process for Phosphatic Clay Disposal.*** Florida Institute of Phosphate Research, 2008.

TÃO, D.; PAREKH, B. K.; ZHAO, Y.; ZHANG, P. ***Pilot-Scale Demonstration of Deep Cone™ Paste Thickening Process for Phosphatic Clay/Sand Disposal*****.** Separation Science and Technology, v. 45, n. 10, p. 1418–1425, 2010.

TÃO, G. S. et al. ***Challenges in dewatering and tailings management of phosphate slimes.*** Pedosphere, v. 18, p. 515–523, 2008.

VALADÃO, G. E. S.; BARREDA, R. H. O. **Polímeros desaguadores para disposição de rejeitos adensados.** HOLOS, v. 36, n. 8, e10884, 2020.

VAZ, L. G. de L. **Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2009.

WAKEMAN, R. J. **Liquid-solid separation.** Thermopedia, 2011. DOI: 10.1615/AtoZ.l.liquid-solid_separation.

WEBB, P. A.; ORR, C. ***Analytical Methods in Fine Particle Technology***. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation, 1997.

WEI, X. et al. ***Advances in thickening and filtration of fine phosphate tailings.*** Minerals, v. 8, n. 7, p. 280–295, 2018.

WILLS, B. A. Mineral Processing Technology: ***An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery***. 5. ed. Oxford: Pergamon Press, 1992.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. ***Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.*** 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

ZAJIC, J. E. ***Microbial flocculation and coagulation***. London: Academic Press, 1971.

ZAJIC, J. E. ***Water Pollution – Disposal and Reuse***. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1971.

ZHANG, L.; MIN, F.; WANG, L.; SHU, Q. ***Polymeric flocculants based on the interfacial characteristics of fine clay minerals:*** a review. Physicochemical Problems of Mineral Processing, v. 58, n. 4, art. 149652, 2022.