



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

IAGO HENRIQUE BERNARDES PEIXOTO

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA LECITINA DE SOJA COMO REAGENTE NO
ESPESSAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

ARAXÁ, MG

2023

IAGO HENRIQUE BERNARDES PEIXOTO

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA LECITINA DE SOJA COMO REAGENTE NO
ESPESSAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais -
Unidade Araxá como parte integrante dos
pré-requisitos para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof.^a Dra. Michelly dos Santos Oliveira

Coorientador: Prof.^o Dr. Mário Guimarães Junior

ARAXÁ– MG

2023

A minha família, amigos e aos que participaram desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por possibilitar alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, por todo apoio e esforço que realizaram ao longo destes 23 anos, sempre acreditando em mim e me ensinando a me tornar melhor a cada dia.

Aos meus amigos, por sempre estarem presentes, apoiando e incentivando.

Aos professores do CEFET, que contribuíram na minha formação, não só acadêmica, como pessoal. Em especial a minha orientadora Michelly dos Santos Oliveira, por todo ensinamento, paciência, confiança e apoio, na realização deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, a indústria mineral vem crescendo exponencialmente. Porém, há algumas questões que têm se mostrado um desafio para a mesma. Dentre os principais desafios, tem-se a redução do consumo de água, a recuperação e o reuso de água nos processos, a produção de rejeitos com maior teor de sólidos e a disposição e gerenciamento ambiental destes. Diante deste cenário, as operações de espessamento se mostram como as mais utilizadas, no contexto do processamento mineral, para desaguamento dos rejeitos. Para melhorar a eficiência dessa operação utiliza-se reagentes químicos (floculantes e coagulantes). Eles proporcionam a agregação das partículas e permitem a recuperação e o reuso da água nos processos. Considerando a lecitina de soja, um reagente alternativo e biodegradável, o presente trabalho busca avaliar seu efeito no espessamento do rejeito de minério de ferro. Além disso, determinar a melhor faixa de pH e dosagem visando aumentar a velocidade de sedimentação e reduzir a turbidez do clarificado. Para isso, foram realizados testes de sedimentação em proveta de 1000 ml, alterando os parâmetros operacionais, empregando-se os valores 5; 6,5 e 8 para o pH e 50, 100 e 150 g/t para a dosagem de lecitina de soja. O *software* MiniTab foi utilizado para realizar a análise estatística. O pH de 5 e a dosagem de 150 g/t foi a condição que apresentou melhor resultado (Teste 2), obtendo como respostas de turbidez e velocidade de sedimentação 178 FTU e 2,16 m/h, respectivamente. Portanto, a lecitina de soja mostrou-se um reagente bastante eficaz, em situações específicas, para agregação das partículas, aumentando a velocidade de sedimentação do rejeito em até 111,76%. Porém, quando comparado com o MagnaFloc 351, na dosagem de 120 g/t e pH de 6.3, apresentou um desempenho inferior.

PALAVRAS-CHAVE: Espessamento. Rejeito de minério de ferro. Lecitina de soja. Agregação.

ABSTRACT

Currently, the mineral industry has been growing exponentially. However, there are some issues that have proven to be a challenge. Among the main challenges are the reduction of water consumption, the recovery and reuse of water in processes, the production of waste with a higher solids content and the disposal and environmental management of these. Given this scenario, thickening operations are the most used, in the context of mineral processing, for dewatering tailings. To improve the efficiency of this operation, chemical reagents (flocculants and coagulants) are used. They provide aggregation of particles and allow the recovery and reuse of water in processes. Considering soy lecithin, an alternative and biodegradable reagent, the present work seeks to evaluate its effect on the thickening of iron ore waste. Furthermore, determine the best pH range and dosage in order to increase the sedimentation speed and reduce the turbidity of the clarified product. For this, sedimentation tests were carried out in a 1000 ml beaker, changing the operational parameters, using values 5; 6.5 and 8 for pH and 50, 100 and 150 g/t for soy lecithin dosage. MiniTab software was used to perform statistical analysis. The pH of 5 and the dosage of 150 g/t was the condition that presented the best results (Test 2), obtaining turbidity and sedimentation speed responses of 178 FTU and 2.16 m/h, respectively. Therefore, soy lecithin proved to be a very effective reagent, in specific situations, for particle aggregation, increasing the tailings sedimentation rate by up to 111.76%. However, when compared with MagnaFloc 351, at a dosage of 120 g/t and pH of 6.3, it presented a lower performance.

KEYWORDS: Thickening. Iron ore tailings. Soy lecithin. Aggregation.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Fluxograma típico no beneficiamento.....	15
Figura 2.2: Representação dupla camada elétrica.	18
Figura 2.3: Potencial zeta conforme o pH para o Quartzo.....	19
Figura 2.4: Potencial zeta conforme o pH para a Hematita.	19
Figura 2.5: Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.	20
Figura 2.6: Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO.	21
Figura 2.7: Mecanismos de agregação com tensoativos: formação de hemimicelas e interação hidrofóbica.	22
Figura 2.8: Adsorção dos flocculantes segundo o mecanismo de pontes.....	24
Figura 2.9: Mecanismo de formação de flocos por meio de pontes com molécula do polímero.	24
Figura 2.10: Etapas do mecanismo de floculação por reversão de cargas.	25
Figura 2.11: Estrutura química dos principais glicerofosfolípidios. Ácido Fosfatídico, 1; Fosfatidilcolina, 2; Fosfatidilinositol, 3; Fosfatidietanolamina, 4; Fosfatidilserina, 5; Lisofosfatidilcolina, 6; Lisofosfatidiletanolamina, 7. R: Grupo de ácidos graxos. Adaptado de (HORROCKS, 1998).	27
Figura 2.12: Etapas do ensaio de proveta (a) e curva de sedimentação resultante do ensaio (b).	29
Figura 2.13: Regime de sedimentação.....	29
Figura 2.14: Etapas de um teste de proveta.....	31
Figura 3.1: Curva granulométrica da amostra.	34
Figura 3.2: Preparação da solução de lecitina de soja.	34
Figura 3.3: Unidade experimental.....	36
Figura 3.4: Instrumento Turbidímetro.	37
Figura 4.1: Testes preliminares com dosagens de 50, 150 e 500 g/t.	41
Figura 4.2: Curvas de sedimentação.....	42
Figura 4.3: Teste 3 (dosagem 50g/t e pH 8).....	43
Figura 4.4: Curva de sedimentação Magnafloc 351 com 120 g/t.	44
Figura 4.5: Gráfico de Pareto para a velocidade de sedimentação.....	45
Figura 4.6: Gráfico Normal para a velocidade de sedimentação.....	45

Figura 4.7: Gráfico de Pareto para a turbidez.	46
Figura 4.8: Gráfico Normal para a turbidez.	47
Figura 4.9: Otimização projetada pelo MiniTab.	47
Figura 4.10: Teste 2, dosagem 150g/t e pH 5.	48

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificações dos minerais de acordo com a granulometria.	17
Tabela 2.2: Estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta.....	19
Tabela 2.3: Principais coagulantes inorgânicos.....	23
Tabela 2.4: Principais floclulantes e respectivas faixas de pH ótimas para aplicação.	26
Tabela 3.1: Composição química da amostra.....	33
Tabela 3.2: Condições dos testes preliminares.	37
Tabela 3.3: Matriz de planejamento fatorial.	38
Tabela 3.4: Dados para formação da polpa.	39
Tabela 4.1: Resultados dos testes preliminares.	40
Tabela 4.2: Resultados do planejamento fatorial.....	42
Tabela 4.3: Comparativo dos testes oficiais com o teste sem reagente.	43

Sumário

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA LECITINA DE SOJA COMO REAGENTE NO ESPESSAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.....	1
AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DA LECITINA DE SOJA COMO REAGENTE NO ESPESSAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.....	2
Lista de Figuras.....	7
Lista de Tabelas.....	9
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1. Minério de Ferro	14
2.2. Separação sólido-líquido	14
2.3. Espessamento	16
2.4. Partículas Ultrafinas	17
2.5. Dupla camada elétrica	18
2.6. Teoria DLVO	20
2.7. Agregação	21
2.7.1. Coagulação.....	22
2.7.2. Flocculação.....	23
2.8. Lecitina de Soja	26
2.9. Teste de proveta	28
2.10. Planejamento Fatorial	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1. Amostra	33
3.2. Flocculante	34
3.3. Ensaio de Proveta	35
3.4. Testes Preliminares	37
3.5. Planejamento Fatorial a Dois Níveis com Ponto Central	38

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1.	Testes Preliminares	40
4.2.	Testes de sedimentação	41
4.3.	Análise Estatística	44
4.3.1.	Velocidade de Sedimentação	44
4.3.2.	Turbidez.....	46
4.3.3.	Otimização dos Resultados	47
5.	Conclusão	49
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	50
7.	Referências Bibliográficas.....	51

1. INTRODUÇÃO

Devido ao constante aumento da demanda de produção no setor mineral com o decorrer dos anos, os teores encontrados nas jazidas minerais se mostram cada vez menores e, por consequência, um maior volume de rejeitos é gerado nas operações de beneficiamento. Desta forma, tem se buscado realizar a disposição dos rejeitos de forma mais segura e menos onerosa.

Atualmente, os processos de beneficiamento mineral e metalúrgicos são amplamente realizados na presença de água. Isto acontece devido às múltiplas vantagens presentes no processamento a úmido. Contudo, diversos desafios estão presentes nas plantas de beneficiamento no Brasil. Destaca-se a preocupação com a redução do consumo de água, sua recuperação e reuso. Além disso, a produção de rejeitos com maior teor de sólidos, sua disposição e o gerenciamento ambiental desses rejeitos também são desafios da mineração.

Neste cenário, visando a produção dos rejeitos com maior teor de sólidos, utiliza-se o espessamento, uma operação de separação sólido-líquido de polpas por sedimentação. O espessamento procura obter um underflow entre 50 e 75% de sólidos, ou obter uma pasta mineral. Atualmente, a pasta se mostrou como uma alternativa viável de disposição de rejeitos pois apresenta uma mitigação nos impactos ambientais e maior recuperação de água de processo.

Os flocculantes desempenham um papel crucial no processo de espessamento de minérios. Esses agentes químicos atuam promovendo a aglomeração de partículas finas presentes na polpa mineral, formando flocos maiores e mais pesados. Esse fenômeno facilita a sedimentação das partículas, promovendo a separação eficaz da água e das partículas sólidas.

Os flocculantes podem ser classificados como naturais, modificados ou sintéticos. Dentre eles, cita-se as poliacrilamidas, carboximetilcelulose, polietilaniminas e amido, sendo o grupo das poliacrilamidas os mais empregados. A utilização de flocculantes e coagulantes acelera a velocidade de sedimentação e reduz a área necessário ao espessamento.

A lecitina de soja é um fosfolípídio que, em função de sua estrutura química, pode ser solubilizada em soluções polares e apolares, o que gera uma grande versatilidade de utilização deste composto químico. Cunha (2022) avaliou a utilização da lecitina de soja como dispersante na flotação de minério fosfático. Contudo, ela

apresentou comportamento oposto, diminuindo a dispersão da polpa. Deste modo, o presente trabalho possui como objetivo avaliar o efeito da lecitina de soja, reagente alternativo e biodegradável, como aglomerante das partículas no espessamento do rejeito de minério de ferro. Além disso, determinar a melhor dosagem e a melhor faixa de pH para a operação de espessamento. Espera-se obter uma avaliação do efeito das variáveis, na velocidade de sedimentação do rejeito e na turbidez do clarificado.

De modo geral, este trabalho foi dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro abordou a introdução e os objetivos do estudo realizado. No segundo apresentou-se as definições acerca dos mecanismos de agregação, os fundamentos que regem a separação sólido-líquido. Subsequente a isso, o terceiro descreveu os procedimentos experimentais adotados para realização desse trabalho. Em sequência foram expostos os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. Por fim, apresentou-se as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.2.1. Minério de Ferro

O ferro é o quarto elemento químico mais abundante na crosta terrestre, precedido por oxigênio, silício e alumínio, sendo desta forma o segundo metal mais expressivo na composição da litosfera (SALES, 2012). Ocupa cerca de 5% da crosta, ocorrendo de forma majoritária ou minoritária em todas as classes minerais. Existem mais de 400 minerais com teores detectáveis de ferro, com concentrações variando de menos de 1% a mais de 70% (TAKEHARA, 2004). Sendo extraído da natureza na forma de minério de ferro e são encontradas em diferentes composições, que são economicamente viáveis, como: óxidos, sulfetos, silicatos e carbonatos (VIEIRA, 2016).

Em termos de metal contido nas reservas, o Brasil ocupa um lugar de destaque no cenário mundial, devido aos altos teores de ferro em seus minérios. Os principais estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro são Minas Gerais (72,5%), Mato Grosso do Sul (13,1%) e Pará (10,7%). Dentre as principais empresas produtoras estão Vale S.A. (73,77%), Companhia Siderúrgica Nacional (4,49%), Samarco Mineração S.A. MG (3,98%) e Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A (2,97%) (ANM, 2016).

O Brasil, em 2011, foi indicado como o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, tendo produzido, em 2010, 372 milhões de toneladas, o equivalente a 15% do total mundial (IBRAM, 2011). Segundo a (ANM), em 2011, foram produzidas mais de 110 milhões de toneladas de minério de ferro. No entanto, no mesmo ano, o comércio interno caiu cerca de 64%. Porém em termos econômicos houve uma queda de somente 24%, o que evidenciou o aumento do preço no mercado interno.

Em virtude de suas propriedades químicas e físicas, o minério de ferro é a matéria-prima básica da siderurgia (99%). O restante é utilizado como carga na indústria de ferroliga, cimento e eventualmente na construção de estradas (OMACHI, 2015).

1.2.2.2. Separação sólido-líquido

A etapa de separação sólido-líquido é considerada crucial no fluxograma de beneficiamento de minérios, de acordo com Luz, Sampaio e França (2010). A figura 2.1 ilustra um fluxograma típico, destacando as principais operações unitárias dessa etapa, sendo estas espessamento, filtragem e secagem. Segundo Valadão e Araujo

(2012), várias outras etapas podem ser utilizadas tais como centrifugação, peneiramento, secagem, flotação e separação magnética.

Nos processos de tratamento observa-se que o desaguamento ocorre em pelo menos duas etapas, principalmente para o concentrado, primeiro espessamento ou hidrociclonação e logo após a filtração, o produto espessado é filtrado para obtenção de uma torta úmida com 80 a 90% de sólidos (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

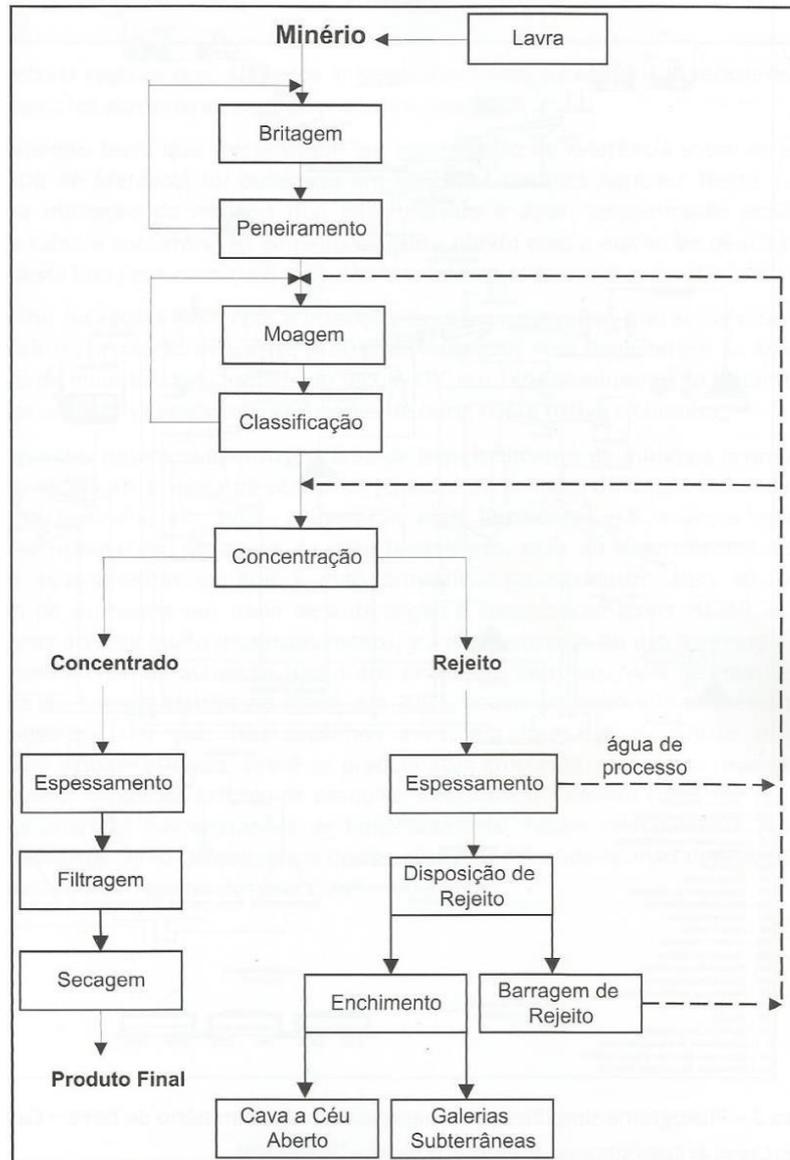


Figura 2.12.1 - Fluxograma típico no beneficiamento.

Fonte: LUZ, SAMAPAILO e FRANÇA (2010).

A separação sólido-líquido têm como objetivos a recuperação/recirculação de água; a preparação de polpas com porcentagem de sólidos adequada a etapas subsequentes; o desaguamento final de concentrados e a preparação de rejeitos para o descarte (VALADÃO; ARAUJO, 2012). Normalmente, apresenta alto consumo

energético, no caso da concentração de cobre, por exemplo, esse consumo só é suplantado pela fragmentação e flotação. Para os minérios de ferro processados no Quadrilátero Ferrífero (MG), esse consumo energético representa de 15 a 40% do total (VALADÃO; ARAUJO, 2012).

Diversos fatores podem influenciar no projeto e na operação de sistemas de separação sólido-líquido. Dentre eles, podem ser destacados a distribuição granulométrica do sólido; área superficial do sólido; forma da partícula; características de superfície do sólido; forma da partícula; características de superfície do sólido; porcentagem de sólidos na polpa e viscosidade do líquido.

No caso de suspensões/polpas minerais contendo partículas menores que $10\mu\text{m}$, especialmente na fração argila ($<2\mu\text{m}$), a operação de separação sólido-líquido é extremamente afetada pelo efeito de dispersão das partículas, causado pelo movimento browniano característico dos colóides, o qual dificulta a sedimentação. Nestes casos, deve-se avaliar a necessidade de aglomeração prévia das partículas (coagulação/floculação) antes de submetê-las à operação de separação propriamente dita. A presença de partículas ultrafinas tem efeito na eficiência de espessamento, reduz as taxas de filtração e podem acumular mais umidade do que a desejada nas tortas oriundas da filtração (FRANÇA; MASSARANI, 2010).

1.3.2.3. Espessamento

A etapa de espessamento consiste na sedimentação das partículas suspensas em meio aquoso através da ação da gravidade. Como resultado, são obtidas duas operações unitárias: clarificação e espessamento. O objetivo da clarificação é produzir um produto clarificado, overflow, ou seja, um líquido com o mínimo ou nenhum vestígio de sólidos presente. Já o espessamento, underflow, se dá ao inverso da clarificação, em que o objetivo é produzir um produto extremamente adensado, até o valor máximo permitido para a operação subsequente (PIMENTA, 2015).

O espessamento é empregado para recuperar água de polpas de rejeitos ou concentrados, elevar a concentração de sólidos nas polpas de rejeitos para posterior descarte, elevar a densidade de polpa buscando-se melhorar as operações seguintes como filtração e separar os constituintes dissolvidos de resíduos lixiviados em instalações hidrometalúrgicas (LARA, 2011). Ainda de acordo com Luz, Sampaio e França (2010), podem-se destacar quatro principais aplicações dos espessadores na indústria da mineração:

- adensamento de polpas, ou seja, aumento da concentração de sólidos, a fim de adequá-las para processos subsequentes. Um exemplo disto é a elevação da porcentagem de sólidos em minérios de ferro de 45 para 70%, para o bombeamento por meio de minerodutos;
- espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando o transporte e descarte mais eficazes;
- recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos.
- recuperação de água para recirculação nos processos industriais, objetivando a recuperação máxima desse recurso, o que implica em diminuição de custos e para a captação de água nova.

1.4.2.4. Partículas Ultrafinas

Cada vez mais os minérios tendem a apresentar menores granulometrias para conseguirem ser liberados, consequência dos teores baixos das jazidas. O tratamento de partículas muito finas é um desafio muito grande para a indústria mineral (LINS e ADAMIAN, 2000). Na Tabela 2.1 são apresentadas as classificações dos minerais de acordo com a granulometria.

Tabela 2.1: Classificações dos minerais de acordo com a granulometria.

Classificação	Granulometria
Grossos	> 500 μm
Médios	< 500 μm
Finos	< 100 μm
Superfinos/pré-coloidais	< 20 μm
Ultrafinos/quase-coloidais	< 10 μm
Coloidais	< 1 μm
Supercoloidais	< 0,2 μm

Fonte: Lins e Adamian (2000).

As forças de natureza física tornam-se desprezíveis conforme a granulometria das partículas vai diminuindo, enquanto as forças de superfície crescem de importância e passam a determinar o comportamento dos sistemas coloidais (BALTAR, 2010). De acordo com Baltar (2010) é de fundamental importância para as etapas de desaguamento que se entenda os mecanismos envolvidos na agregação das partículas. De acordo com Santos (2013), as partículas ultrafinas apresentam grande estabilidade em razão da sua reduzida dimensão e possuem cargas

superficiais que promovem a sua repulsão. Se tratando de partículas coloidais, é importante que alguns termos sejam esclarecidos, como *Dupla camada elétrica* (DCE).

4.5.2.5. Dupla camada elétrica

As partículas minerais, presentes em meio aquoso adquirem cargas elétricas superficiais devido à interação das espécies iônicas da superfície com as moléculas de água. Conseqüentemente, os íons de cargas opostas são atraídos para essas superfícies, estabelecendo a Dupla Camada Elétrica (figura 2.2), constituída de uma superfície carregada e um meio polar onde se distribuem os contra íons (BALTAR, 2010).

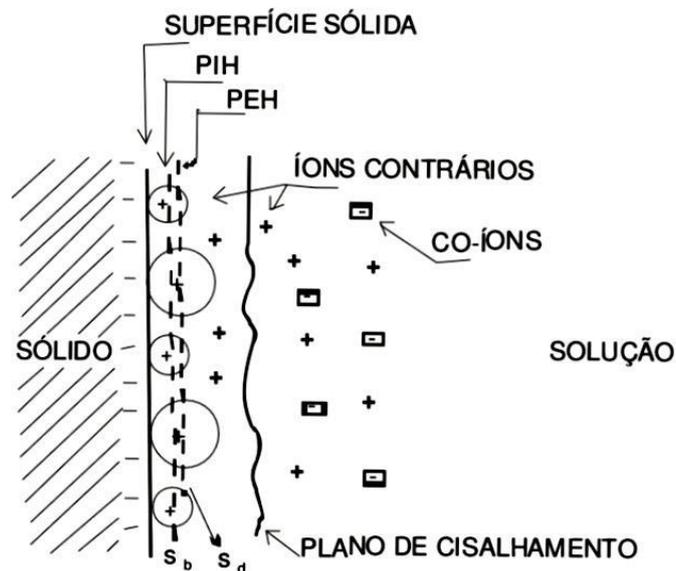


Figura 2.22.2: Representação dupla camada elétrica.
Fonte: Adaptado de Paiva (2004).

Durante a movimentação das partículas na suspensão há um cisalhamento entre a camada de íons próximos à superfície, que se move com a solução, e a camada difusa. Esse limite é plano de deslizamento. O potencial no plano de cisalhamento é denominado potencial zeta (ζ), a magnitude deste depende do potencial da superfície e da concentração e carga dos íons contrários (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Este potencial sofre grande influência com a variação do pH do meio (MONTE E PERES, 2010; HENRIQUES, 2012). Outra definição importante é o ponto isoelétrico (PIE), ponto em que a carga líquida no plano de cisalhamento (ponto zeta) corresponde a zero, ou seja, potencial zeta nulo. O PIE da figura 2.3 seria no pH igual a 3,8, enquanto que o da figura 2.4 seria no pH igual a 6,3. A Tabela 2.2 demonstra o

estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta. Nota-se na figura que a agregação das partículas é favorecida nas condições próximas ao PIE.

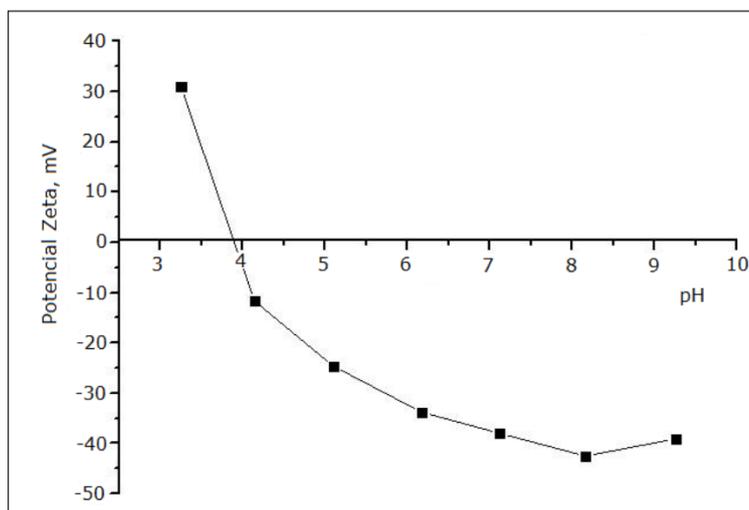


Figura 2.3.2-3: Potencial zeta conforme o pH para o Quartzo.

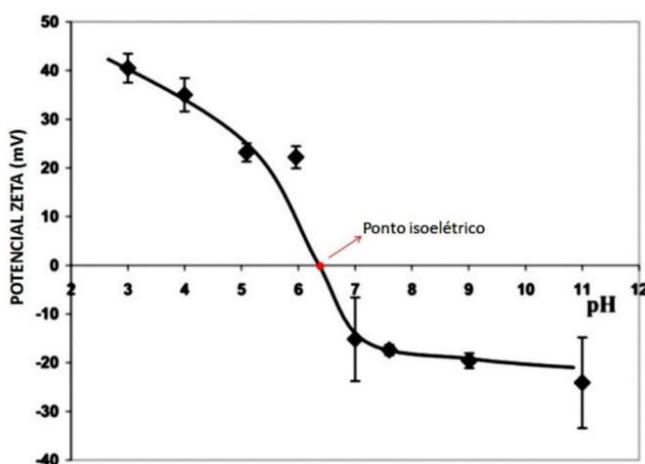


Figura 2.4: Potencial zeta conforme o pH para a Hematita.

Fonte: Pan et al. (2004).

Tabela 2.2: Estado de estabilidade das partículas em função do potencial zeta.

Características do estado de estabilidade	Potencial zeta (mV)
Faixa de agregação máxima	+3 a 0
Faixa de agregação forte	+5 a -5
Limite de agregação	-10 a -15
Limite de estabilidade	-16 a -30
Faixa de estabilidade moderada	-31 a -40
Faixa próxima a uma boa estabilidade	-41 a -60
Faixa de estabilidade muito boa	-61 a -80
Faixa extremamente boa de estabilidade	-81 a -100

Fonte: Riddick (1969)

1.6.2.6. Teoria DLVO

A agregação e a dispersão de partículas de granulometria coloidal são normalmente influenciadas pelas forças de Van de Waals (atrativas) e as forças entre as duplas camadas elétricas (repulsivas), de acordo com a teoria DLVO (Derjaguin e Landau; Verwey e Overbeek) de estabilidade coloidal. A energia total de interação (VT) é dada pela soma das forças de Van der Waals (VW) e as forças elétricas (VE) (LINS e ADAMIAN, 2000). A figura 2.5 apresenta a curva de energia de interação, entre duas partículas, em função da distância de aproximação mútua.

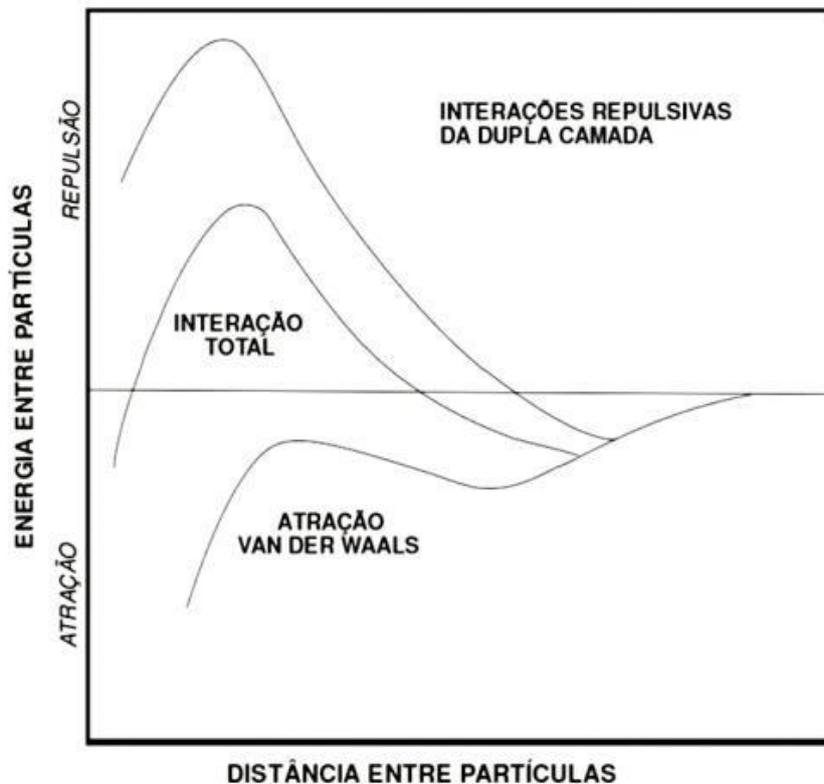


Figura 2.52-4: Curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.

Fonte: Paiva (2004).

Além das forças de Van de Waals e das forças elétricas, conforme referido por Lins e Adamian (2000), a energia total (VT) de interação entre partículas minerais envolve também a influência de outras forças como, por exemplo, das forças de interação hidrofóbica (repulsiva) ou hidrofílica (atrativa), denominadas VS, da componente Vass, oriunda da associação hidrofóbica das cadeias orgânicas dos coletores adsorvidos nas partículas, da interação procedente de forças magnéticas entre partículas expostas à ação de um campo magnético (VM) e também do efeito de repulsão, resultante da interação entre as partes externas de polímeros adsorvidos.

A figura 2.6 apresenta o comparativo entre as teorias DLVO e X-DLVO, onde se percebe que ao considerar as componentes VS e VAss a interação total começa a decrescer. No entanto, quando não consideram essas componentes (teoria DLVO) a interação total resulta em uma repulsão das partículas. Sendo assim, a Equação 2.1 representa a energia total de interação entre as partículas de acordo com a teoria X-DLVO (LINS e ADAMIAN, 2000).

$$V_T = [V_W + V_E] + V_S + V_{Ass} + V_M + V_{Est} + \dots \quad [2.1]$$

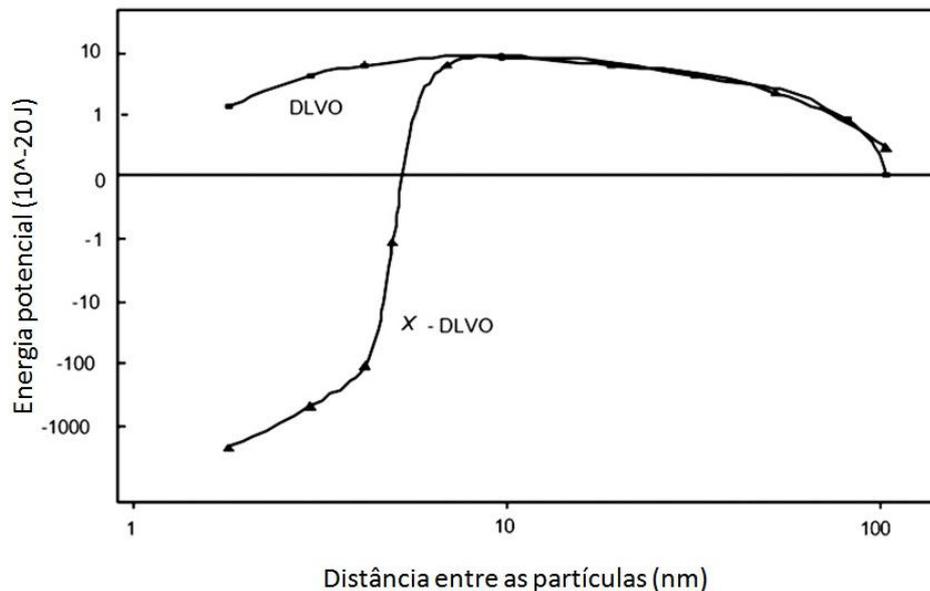


Figura 2.62-5: Curvas de energia de interação entre partículas ultrafinas de rodocrosita: teoria DLVO e teoria X-DLVO.

Fonte: Lins e Adamian (2000).

1.7.2.7. Agregação

Os minerais em faixas granulométricas finas (menores que $74\mu\text{m}$) usualmente respondem mal às operações tradicionais de separação sólido-líquido. Nestas faixas granulométricas, o fenômeno da dupla camada elétrica e forças intermoleculares controlam a interação entre as partículas (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

A agregação de partículas finas é uma metodologia empregada na separação destas do meio líquido e pode ser realizada adicionando-se reagentes, como coagulantes, polímeros floculantes ou tensoativos, permitindo a adesão de uma partícula diretamente à outra (GADELHA; ANDRADE; FRANÇA, 2015).

De acordo com Oliveira e Rubio (2011), a desestabilização de partículas em meio aquoso pela adição de reagentes tensoativos é decorrente da adsorção destes reagentes na interface sólido-líquido, tornando as partículas hidrofóbicas, propiciando

uma aproximação e, assim, uma agregação. A figura 2.7 apresenta os mecanismos de agregação com tensoativos.

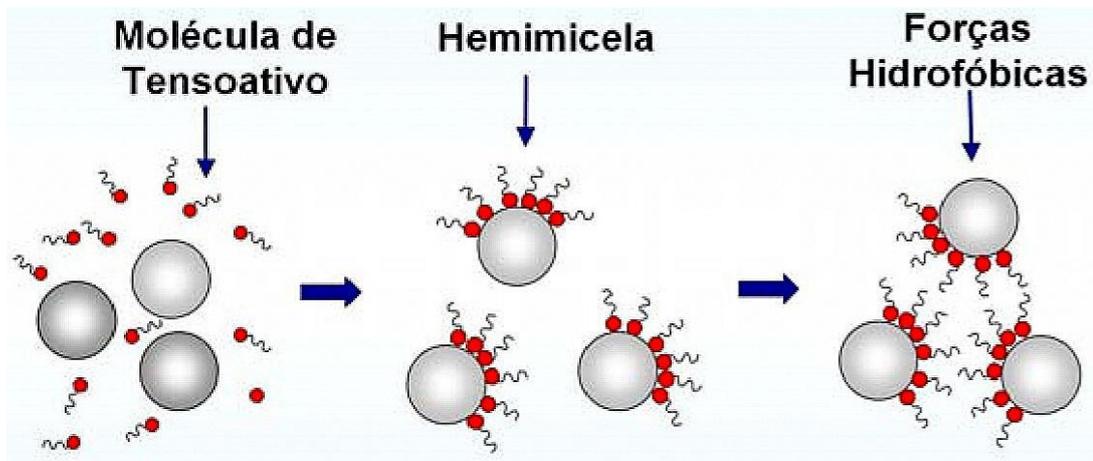


Figura 2.7.2-6: Mecanismos de agregação com tensoativos: formação de hemimicelas e interação hidrofóbica.

Fonte: Oliveira e Rubio (2011).

4.7.4.2.7.1. Coagulação

A coagulação acontece no momento em que partículas finas se ligam umas às outras por forças atrativas de Van der Waals, que são definitivas, se e somente se, estiverem à uma distância relativamente pequena. A adesão provocada por estas forças não é válida uma vez que as partículas se encontram envoltas por uma atmosfera carregada que, normalmente, ocasiona uma repulsão entre as partículas que se aproximam (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Para se agregar as partículas, empregam-se eletrólitos cujas cargas são contrárias ao da superfície da partícula, neutralizando parte da carga e reduzindo a repulsão eletrostática, fazendo com que as forças de Van Der Waals iniciem a coagulação (GUIMARÃES, 2010).

A presença de colisões é de suma importância para o processo de agregação de partículas sólidas, permitindo a aproximação das mesmas e a formação de forças atrativas entre elas. As principais causas que influenciam a frequência dessas colisões são o tipo de coagulante empregado, as características químicas da água, a faixa

granulométrica das partículas, a concentração relativa dos sólidos e sua movimentação e a temperatura da polpa (RESENDE NETO, 2016).

De acordo com Barreda (2012), os reagentes utilizados no processo de coagulação são agrupados em coagulantes, alcalinizantes e coadjuvantes. Os reagentes coagulantes geralmente são compostos de ferro ou alumínio e apresentam baixos pesos moleculares, sendo capazes de produzir hidróxidos gelatinosos insolúveis englobando as partículas e reduzindo a turbidez da fase aquosa. Os alcalinizantes são capazes de conferir a alcalinidade necessária à coagulação, enquanto que os coadjuvantes aumentam a densidade das partículas, tornando os agregados mais pesados. A Tabela 2.3 ilustra os principais coagulantes inorgânicos e as faixas de pH em que se obtém os melhores resultados.

Tabela 2.3: Principais coagulantes inorgânicos.

Coagulante	Faixa de pH
Polihidroxicloreto de alumínio (PAC)	6,5-7,3
Sulfato de alumínio	4,5-7,5
Cloreto férrico	6,0-7,5
Sulfato férrico	6,0-7,5

Fonte: BRAGANÇA (2008, p. 15).

1.7.2.2.7.2. Flocculação

A flocculação é a agregação causada por formação de pontes de ligação entre as moléculas de polímeros e as partículas. Flocos formados buscam otimizar a sedimentação e provocam a clarificação do sistema. A flocculação gera uma suspensão não homogênea em uma escala macroscópica (SHARMA et al., 2006; SOUSA, 2012, p. 10).

Os floculantes são reagentes químicos que criam pontes entre as partículas. Para que esse evento ocorra é necessária a adsorção de polímeros diretamente na superfície das partículas ou na camada da interface iônica. A figura 2.8 representa a adsorção dos floculantes segundo mecanismo de pontes.

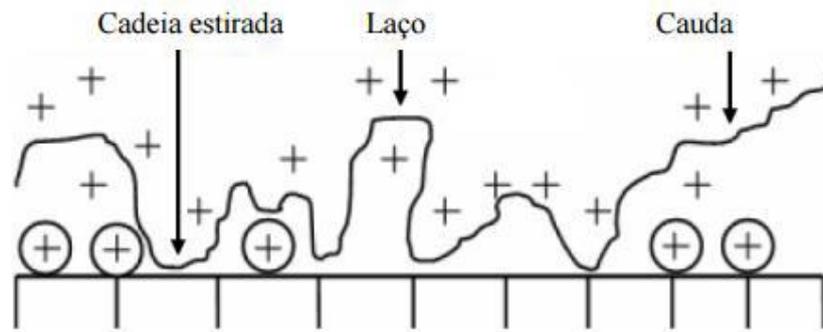


Figura 2.82-7: Adsorção dos flocculantes segundo o mecanismo de pontes.

Fonte: RESENDE NETO, 2016.

A flocculação por formação de pontes ocorre quando são utilizados polímeros de alto peso molecular, não iônicos ou com carga elétrica de mesmo sinal em relação à superfície do mineral. Somente uma parte da molécula interage diretamente com o sólido, sendo que o restante da cadeia se estende em forma de braços que poderá fazer contato com outras partículas (figura 2.8). Assim, os flocos formados podem se unir aos outros formando agregados maiores. Os flocos produzidos a partir da flocculação por pontes apresentam estruturas abertas, onde as partículas não se tocam e a ligação ocorre por meio da macromolécula flocculante. O crescimento dos flocos ocorre de maneira rápida, formando flocos grandes e flexíveis, de forma helicoidal, retendo quantidade expressiva de água. Apesar da presença de água acarretar uma redução na densidade média do floco, a velocidade de sedimentação seria compensada pelo grande tamanho do mesmo (BARREDA, 2008). A figura 2.9 representa o mecanismo de formação de flocos por meio de pontes.

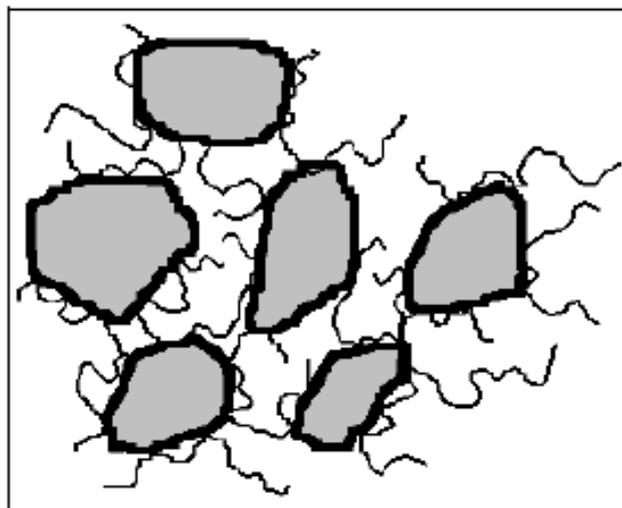


Figura 2.92-8: Mecanismo de formação de flocos por meio de pontes com molécula do polímero.

Fonte: Baltar (2010).

A floculação por reversão de carga acontece quando o polímero usado (polímero de baixa ou média massa molecular) possui carga contrária à superfície da partícula. Assim, o polímero se dispersa na polpa mineral, sendo capaz de reverter a carga elétrica na adsorção, resultando em uma superfície com cargas heterogêneas (REIS, 2010). Como consequência, a superfície passa a apresentar uma distribuição heterogênea de cargas, com áreas positivas e negativas, fazendo com que a colisão entre áreas com cargas opostas de duas partículas origine a formação do floco (BALTAR, 2010). A figura 2.10 ilustra as etapas do mecanismo de floculação por reversão de carga.

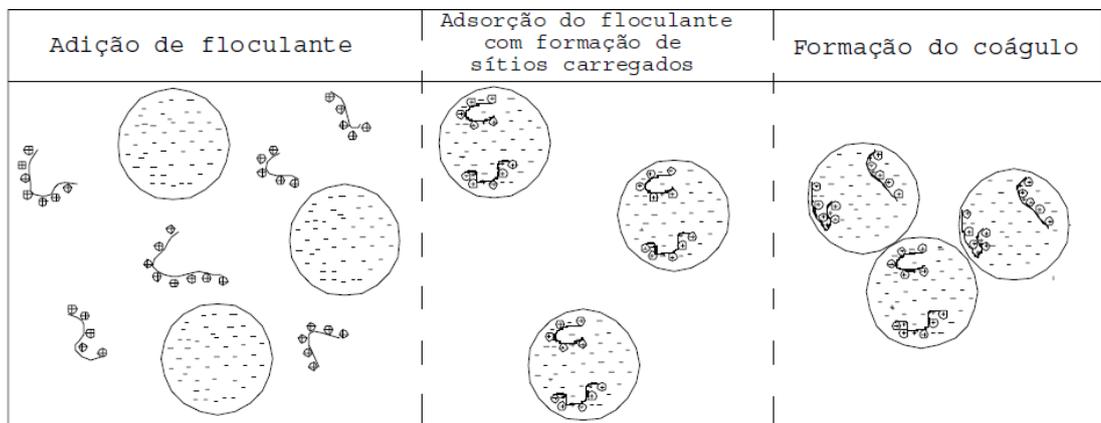


Figura 2.102-9. Etapas do mecanismo de floculação por reversão de cargas.

A escolha do reagente deve levar em conta o tamanho da cadeia molecular, natureza iônica do polímero, densidade iônica e características químicas dos grupos ativos da molécula. O tipo de floco desejado irá influenciar na escolha do reagente. Durante a operação de espessamento torna-se importante a presença de flocos grandes, na filtração os flocos devem ser compactos, com o mínimo de água no seu interior.

A forma de adição do flocculante influi no seu desempenho. A solução diluída do flocculante deve ser adicionada à polpa sob forte agitação, reduzindo o tempo de homogeneização completa. Após o início de ruptura da molécula do polímero, a agitação deve ser reduzida ao máximo (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Em relação à dosagem de flocculante a ser adicionada em polpas minerais, torna-se necessário que exista um limite prático para este parâmetro. Se o flocculante for adicionado em excesso relação ao limite prático, as partículas ficarão recobertas pelo polímero. Como resultado, sua ação será anulada e o mesmo passará atuar como dispersante, tendo assim, efeito contraditório ao esperado (FERREIRA, 2012).

Para a indústria mineral os polímeros neutros mais importantes são as poliacrilamidas (PAM) e o poli(óxido)etileno (POE). As poliacrilamidas são utilizadas como floculantes numa grande variedade de pesos moleculares. Na Tabela 2.4 observa-se os floculantes mais utilizados e suas respectivas faixas ótimas de pH (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Tabela 2.4: Principais floculantes e respectivas faixas de pH ótimas para aplicação.

Floculante	Faixa de pH
Poliacrilamida não iônica	0 a 12
Poliacrilamida aniônica	5 a 11
Poliacrilamida catiônica	4 a 12
Oxido de polietileno	3 a 11
Amido	2 a 10

Fonte: VALADAO (2004, p. 16).

De acordo com Nunes (2011), ter o controle do pH é importante, já que dependendo de seu valor as partículas podem coagular. Uma forma de se obter um resultado ótimo é associando coagulantes e floculantes. É necessário conhecer a faixa de ionização do floculante e trabalhar dentro dela, já que a utilização de um pH básico pode afetar as cargas superficiais das partículas e também a ionização do polímero utilizado, deixando principalmente partículas muito finas em dispersão.

1.8.2.8. Lecitina de Soja

A lecitina de soja é mundialmente utilizada e conhecida como emulsificante, principalmente alimentício. Sendo, um subproduto da linha de produção do óleo vegetal bruto degomado que possui alto valor agregado. Existe uma diversidade muito grande de tipos de lecitinas encontradas no mercado, à disposição para consumo, com características físico-químicas e reológicas diferentes dependendo da finalidade de uso ou aplicação industrial (CASTEJON, 2015).

O termo lecitina é uma denominação muito geral e comercial, que descreve a composição de componentes lipídicos de um emulsificante derivado do óleo bruto da soja. Entretanto, em termos químicos, o nome lecitina também representa a classe das fosfatidilcolinas e são considerados sinônimos (RAJ et al., 2010).

A lecitina de soja comercial é padronizada com óleo de soja e classificada como emulsificante por possuir em sua composição cerca de 60% de matéria insolúvel em

acetona, ou seja, fosfolipídeos. Segundo STOPPER; SAFFER; BAUER (1953), são compostos por fosfatidilcolina, fosfatidilinositol, fosfatidiletanolamina e açúcares. Existem outros compostos polares que podem ser extraídos pelo processo de degomagem e constituírem as lecitinas. Estes são proteínas e sais catiônicos, de cálcio, magnésio e ácidos fosfóricos livres (BEI, 2005). A figura 2.11 apresenta as principais estruturas químicas dos glicerofosfolipídios.

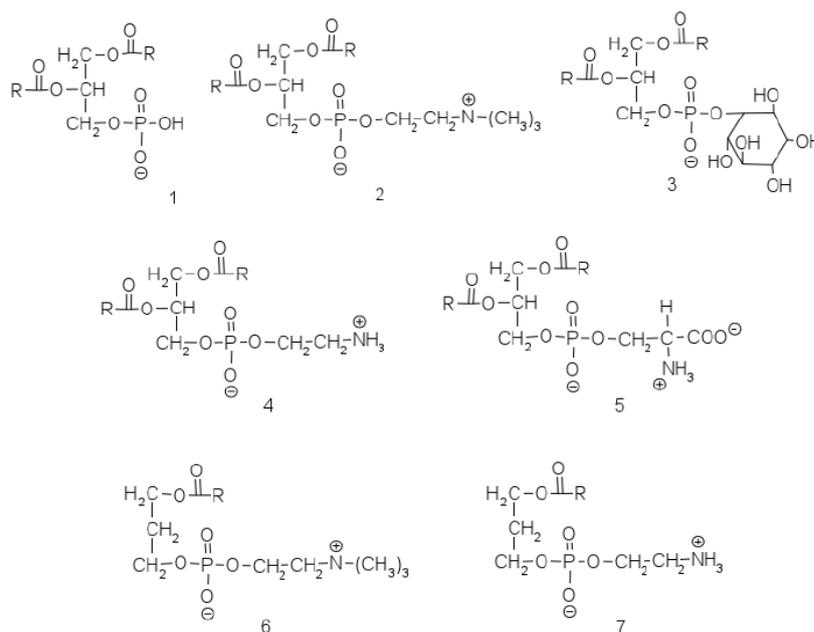


Figura 2.112-40: Estrutura química dos principais glicerofosfolipídios. Ácido Fosfatídico, 1; Fosfatidilcolina, 2; Fosfatidilinositol, 3; Fosfatidietanolamina, 4; Fosfatidilserina, 5; Lisofosfatidilcolina, 6; Lisofosfatidiletanolamina, 7. R: Grupo de ácidos graxos. Adaptado de (HORROCKS, 1998).

A lecitina de soja tem propriedade emoliente, emulsificante e solubilizante. Sendo assim, ela é muito utilizada nas indústrias farmacêutica e de alimentos (BATISTUZZO, 2011). Se trata de um fosfolipídio que, em função de sua estrutura química, pode ser solubilizada em soluções polares e apolares, o que gera uma grande versatilidade de utilização deste ingrediente. Cada vez mais a aplicação da lecitina como emulsificante vem sendo reconhecida (SALGADO, 2007).

Os emulsificantes são moléculas ativas que aderem à superfície das gotículas formadas durante a homogeneização, promovendo a estabilidade da emulsão. A maioria dos emulsificantes de alimentos são moléculas anfifílicas, ou seja, eles têm ambas as regiões polares e apolares na mesma molécula. Os tipos mais comuns utilizados na indústria de alimentos são emulsionantes de base lipídica (fosfolipídios) e biopolímeros anfifílicos (proteínas e polissacarídeos) (DICKINSON, 1992).

Em função dessas características anfifílicas, os emulsificantes reduzem a tensão interfacial das fases imiscíveis ou a energia necessária para deformar e romper

uma gota, permitindo, portanto, que as duas fases se dispersem, formando uma emulsão estável (NIEUWENHUYZEN, 2010).

Cunha (2022) utilizou a lecitina de soja, na dosagem de 300 g/t, para avaliar seu desempenho como dispersante. Contudo, o reagente promoveu a agregação das partículas.

1.9.2.9. Teste de proveta

Segundo França e Massarani (2010), a operação de sedimentação é baseada em fenômenos de transporte, em que a partícula sólida em suspensão está sujeita a ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência. Mecanismo de sedimentação descontínua auxilia na descrição do mecanismo contínuo, com o uso do teste de proveta, que é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo.

Uma amostra previamente homogeneizada da suspensão é colocada em um tubo graduado de seção constante (proveta) e deixada em repouso. Pode-se verificar que, após certo tempo, as partículas mais grossas depositam no fundo do tubo e as partículas mais finas continuam em suspensão, enquanto as intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas de acordo com a sua granulometria (CHAVES et al., 1996).

Segundo Oliveira, Luz e Lacerda (2004), o teste fundamenta-se na movimentação da interface superior da suspensão que se desloca em relação ao tempo, conforme ilustra a figura 2.12. Geralmente, estes testes são realizados em provetas de 1000 mL ou 2000 mL. Em função do gradiente da altura desta interface em relação ao tempo, pode-se inferir sobre a operação de sedimentação das partículas em suspensão nesta polpa.

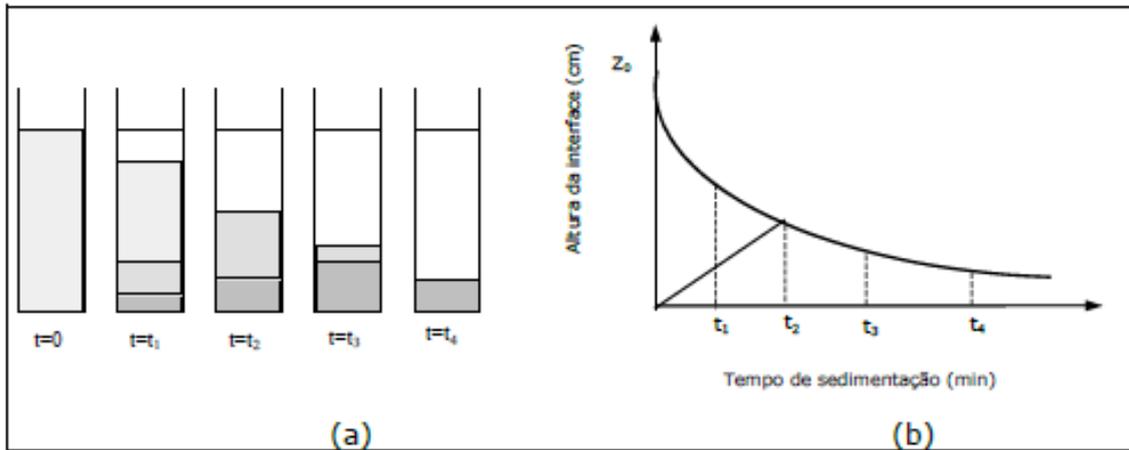


Figura 2.12-14: Etapas do ensaio de proveta (a) e curva de sedimentação resultante do ensaio (b).

Fonte: FRANÇA E CASQUEIRA, 2007.

Durante esse teste pode ser observada a coexistência de três regiões distintas, como ilustra a Figura 2.13. Sendo estas, a região de líquido clarificado, de sedimentação por zona e de compactação. Algumas considerações físicas devem ser estabelecidas, a fim de caracterizar cada região.

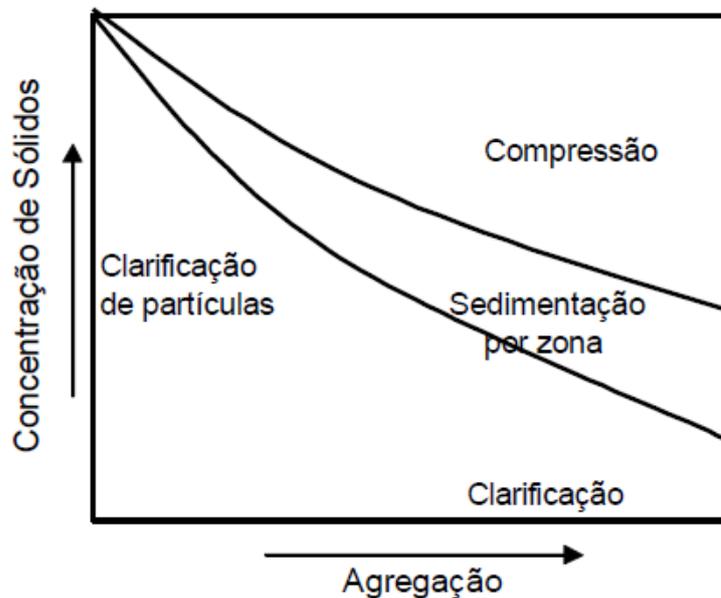


Figura 2.13-12: Regime de sedimentação.

Na região de líquido clarificado, em situações de altíssima diluição de polpa, as partículas estão distantes umas das outras e podem sedimentar praticamente sem influências mútuas. Se uma partícula maior afunda mais rapidamente e colide com outra partícula, e se há tendência para a formação de flocos, as duas se agregam e passam a sedimentar com velocidade ainda maior. Se não há essa tendência, após a

colisão as duas partículas continuam seu movimento individual sem interferências mútuas, cada uma com sua velocidade própria.

A região de sedimentação por zona ou por fase, ocorre com partículas floculadas e também quando a concentração de partículas na polpa aumenta e atinge-se uma condição em que cada partícula está em contato com as vizinhas e elas descem em conjunto, aprisionando as demais nessa estrutura e fazendo-as afundar com a mesma velocidade. Forma-se uma interface nítida entre a polpa em sedimentação e o líquido sobrenadante. Em outros casos, ocorre uma situação especial, em que as partículas (ou flocos), mesmo sendo heterogêneas, se unem umas às outras e formam uma estrutura que afunda em conjunto, aprisionando outras partículas durante o percurso descendente. Todas as partículas, então, sedimentam juntas (mesma velocidade de sedimentação) e forma-se uma interface nítida entre a fase de sedimentante e sobrenadante, esse regime é chamado de sedimentação por fase. Nessa etapa, o líquido em torno das partículas (ou flocos) é empurrado para cima pelo movimento descendente delas, quase como se estivesse ocorrendo uma filtração da água através do leito descendente de partículas (CHAVES et al., 2013).

A região de compactação, acontece quando as partículas se encontram tão adensadas que uma está em contato com as outras e o adensamento só pode ocorrer por causa da compactação do conjunto em decorrência do peso das partículas sobrejacentes. É nesse estágio que ocorre melhor acomodação do material, permitindo a eliminação de bolsões de água e ar, mantendo a suspensão estável.

O regime de compressão ocorre quando há uma grande densidade de polpa ou elevada tendência de formação de agregados. As estruturas que se formam são capazes de suportar mecanicamente as camadas superiores devido à sua rigidez (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004). A figura 2.14 representa as etapas de um teste de proveta.

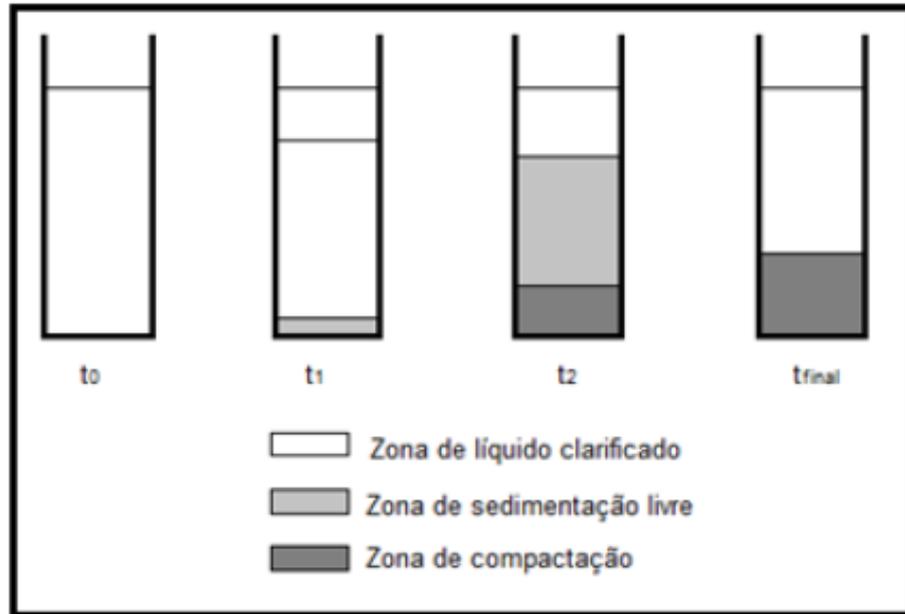


Figura 2.14: Etapas de um teste de proveta.

Fonte: FRANÇA E MASSARANI, 2004.

Segundo França e Casqueira (2007), a movimentação descendente das partículas ou flocos em uma polpa, num ensaio de proveta, deverá ser apenas função do tempo e da concentração dos sólidos.

O ensaio de teste de proveta, apesar de parecer muito simples, serve como base não só para o dimensionamento de espessadores de qualquer tamanho, mas também para o estabelecimento das condições ótimas de aplicação de pH, dosagem de floculante e porcentagem de sólidos (CHAVES et al., 1996).

Lopes (2017) objetivou estudar otimização dos parâmetros operacionais, dosagem de floculante, pH da polpa e porcentagem de sólidos, em teste de sedimentação. Através do uso de um reagente floculante, poliacrilamida aniônica, estruturou seus ensaios variando a dosagem entre 15 e 30 g/t, a porcentagem de sólidos entre 25 e 40% e o pH entre 5 e 6,5. Em seus resultados, foi identificado que a variável porcentagem de sólidos foi a mais impactante nos resultados de turbidez e velocidade de sedimentação.

1.10.2.10. Planejamento Fatorial

Planejar experimentos é definir uma sequência de coleta de dados experimentais para atingir certos objetivos. O planejamento é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Os fatores são na maioria das vezes variáveis controláveis, já as respostas são as variáveis de saída do sistema (GONÇALVES, 2016; BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). O planejamento experimental é a especificação detalhada de todas as operações experimentais que devem ser realizadas, com base no objetivo que se pretende atingir (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). O planejamento fatorial a dois níveis (2^k) é a técnica mais utilizada e mais simples para identificar as influências entre as variáveis de um sistema. O planejamento fatorial 2^k utiliza k fatores analisados em 2 diferentes níveis, um nível máximo (+1) e um nível mínimo (-1) (GONÇALVES, 2016 e BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

2.3. MATERIAL E MÉTODOS

Este tópico aborda a metodologia que será utilizada na realização dos ensaios de proveta deste trabalho.

4.1.3.1. Amostra

O material utilizado para o desenvolvimento da pesquisa, representa o mesmo material dos trabalhos de Lopes (2017) e Martins (2022), um rejeito de minério de ferro. Ele é proveniente do município de Itatiaiuçu-MG. A amostra representa a alimentação do espessador de rejeitos da usina de beneficiamento.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química da amostra obtida por fluorescência de raio X. O rejeito é composto predominantemente por quartzo (73%) e hematita (18%) (MARTINS, 2022). Sua massa específica é igual a 2,82 g/cm³, este valor foi utilizado para todos os cálculos de polpa. A figura 3.1 apresenta os resultados da curva granulométrica do rejeito, sendo considerado fino logo que apresenta um d90 = 77,47 µm (MARTINS, 2022).

Tabela 3.1: Composição química da amostra.

Espécie Química	Composição (%)
SiO₂	72,977
Fe₂O₃	17,941
Al₂O₃	7,996
MnO	0,484
K₂O	0,180
SO₃	0,161
P₂O₅	0,147

Fonte: MARTINS, 2022.

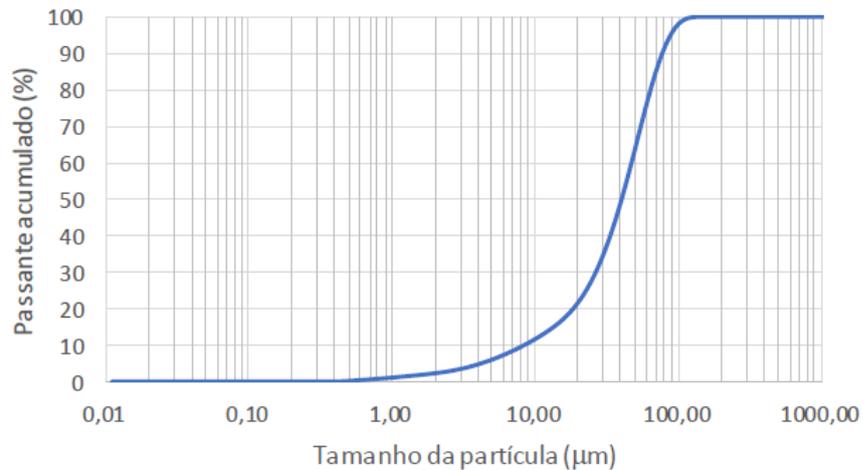


Figura 3.1: Curva granulométrica da amostra.

Fonte: MARTINS, 2022.

1.1.3.2. Floculante

Uma solução aquosa de lecitina de soja foi preparada com concentração de 0,05% (m/m). Água destilada foi utilizada na diluição da solução, o tempo de homogeneização em agitador magnético foi de 30 minutos. A figura 3.2 apresenta a imagem da solução de lecitina de soja.



Figura 3.2: Preparação da solução de lecitina de soja.

Fonte: Autoral

3.3. Ensaio de Proveta

Os ensaios de sedimentação em proveta, seguiram a metodologia de França e Cerqueira (2007). As massas de rejeito e água foram transferidas para uma proveta de 1000 mL, para a formação de uma polpa homogênea, com o percentual de sólidos desejado. E com ajuda de um agitador de proveta manual, todas as partículas foram colocadas em suspensão.

Em suspensão foi aferido o pH da polpa, e foi adicionado o volume de solução do reagente, completando os 1000 mL de polpa. Após adição do reagente, foi realizada a agitação por cinco bateladas para a dispersão da lecitina e interação com as partículas. Ao fim da agitação, foi registrada a altura da interface de clarificação da polpa em intervalos de tempos de 30 segundos. Utilizou-se uma fita no exterior da proveta, onde se fez marcações da altura da interface do clarificado nos intervalos de tempos previamente estabelecidos, até o final do ensaio em que o último ponto coletado foi após 30 minutos. Após a finalização do ensaio, retirava-se a fita e se fazia as medições com uma régua.

Com os resultados foram elaboradas as curvas de sedimentação e as velocidades de sedimentação calculadas pela Equação 3.1, correspondente à região de velocidade constante.

$$V_s = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad [3.1]$$

Para a realização dos ensaios de sedimentação em proveta, manteve-se o percentual de sólidos constante, ou seja, todos os ensaios utilizaram 20% de sólidos (230 g de rejeito), variando-se a massa de água e da solução de reagente, garantindo o volume de polpa de 1000mL, a partir de cada dosagem pré-estabelecida.

Com as partículas em suspensão foi aferido o pH da polpa através de um pHmetro modelo HANNA M-7962. Nos testes com controle de pH para ácido ou básico, foram utilizadas soluções de ácido clorídrico (HCl 1M) e hidróxido de sódio (NaOH 10% m/m), respectivamente. A figura 3.3 ilustra a unidade experimental com proveta e pHmetro.

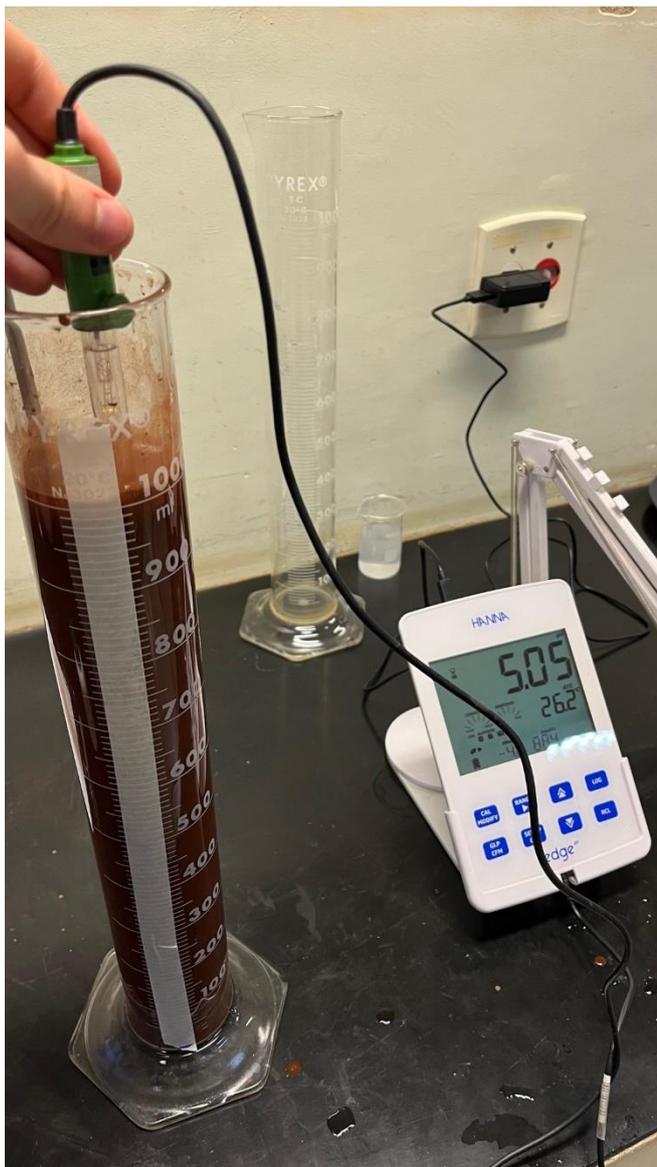


Figura 3.3: Unidade experimental.

Fonte: Autoral

Para a determinação da turbidez do clarificado, fez-se uso do turbidímetro HI93703 da marca Hanna Instruments, que pode ser observado na figura 3.4. Após a finalização do ensaio de sedimentação, aproximadamente 35 minutos, foi coletada uma amostra do clarificado e submetida a medição da turbidez. Uma menor turbidez garante, neste caso, que o clarificado contenha menores quantidades de sólido.



Figura 3.4: Instrumento Turbidímetro.

3.4. Testes Preliminares

Inicialmente foram realizados ensaios de proveta sem adição de reagente, com a polpa em seu pH natural, de aproximadamente 6,5. Na sequência foram realizados testes preliminares para observar o comportamento da lecitina como reagente de agregação das partículas, mantendo pH natural. Assim, os valores definidos para a realização dos testes preliminares estão representados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Condições dos testes preliminares.

Teste	Dosagem (g/t)
P1	0
P2	40
P3	50
P4	70
P5	150
P6	500

Fonte: Autoral

3.5. Planejamento Fatorial a Dois Níveis com Ponto Central

Dentre os objetivos deste trabalho, temos a definição dos melhores parâmetros para a sedimentação do rejeito do minério ferro. Sendo assim, foram escolhidos dois valores distintos de pH e dosagem de reagente para a análise de seus efeitos nos resultados dos testes, velocidade de sedimentação e turbidez do clarificado. As dosagens de reagente utilizadas no planejamento foram determinadas a partir da análise dos resultados obtidos nos testes preliminares, enquanto que, para o pH os níveis foram definidos buscando avaliar o comportamento em uma faixa ácida e uma alcalina. Visto que não se tem trabalhos na literatura sobre o uso de lecitina na mineração, os valores definidos foram aleatórios. Para a otimização do processo de sedimentação tem-se a intenção de maximizar os valores de velocidade de sedimentação e minimizar os valores de turbidez do clarificado. O planejamento fatorial a dois níveis com ponto central foi adotado prevendo maior facilidade de trabalhar com os mesmos valores em todas as replicatas desse ponto. Os níveis e as variáveis estudadas podem ser observados na matriz do planejamento, expressa na Tabela 3.3. Onde X1 e X2 são as variáveis dosagem de lecitina e pH codificadas, respectivamente.

Tabela 3.3: Matriz de planejamento fatorial.

Testes	X ₁	X ₂	Dosagem (g/t)	pH
1	-1	-1	50	5
2	1	-1	150	5
3	-1	1	50	8
4	1	1	150	8
5	0	0	100	6,5
6	0	0	100	6,5
7	0	0	100	6,5

Fonte: Autoral

Conhecendo a massa de sólidos e considerando a dosagem de flocculante pré-determinada, calculou-se a massa de solução de lecitina e de água. Os valores de massa de rejeito, massa de água e massa de solução de lecitina (0,05% m/m) calculados para os testes estão representados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Dados para formação da polpa.

Testes	Massa de sólidos (g)	Solução (g)	Massa de água (g)
1	230	23	897
2	230	69	851
3	230	23	897
4	230	69	851
5	230	46	874
6	230	46	874
7	230	46	874

Fonte: Autoral

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados dos ensaios de sedimentação em proveta com e sem adição de lecitina de soja.

4.1. Testes Preliminares

Os resultados de turbidez e velocidade de sedimentação para os testes preliminares estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resultados dos testes preliminares.

Teste	Dosagem	pH	Turbidez (FTU)	Velocidade de Sedimentação (m/h)
1	0	6,5	529	1,02
2	40	6,5	544	0,85
3	50	6,5	557	0,86
4	70	6,5	563	2,14
5	150	6,5	>1000	-
6	500	6,5	>1000	-

Fonte: Autoral

As velocidades de sedimentação dos testes 5 e 6 não foram incluídas, pois não foi possível visualizar a altura de interface do clarificado, devido à alta turbidez do próprio. Analisando-se os resultados dos testes preliminares, foi possível observar uma relação direta entre a dosagem de reagente e a turbidez. O aumento na dosagem de reagente causou uma redispersão das partículas ultrafinas tornando a turbidez do sobrenadante mais alta. A teoria X-DLVO, prevê um efeito de repulsão, resultante da interação entre as partes externas de polímeros adsorvidos, segundo Lins e Adamian (2000). Logo, percebe-se que com o aumento da dosagem de reagente tivemos resultados inferiores na questão de recuperação do clarificado.

Já para a velocidade de sedimentação, percebe-se um decréscimo em relação ao teste sem reagente, para as dosagens 40 e 50 g/t, e a partir de 70 g/t acredita-se que ocorreu a agregação das partículas, que resultou em um aumento na velocidade de sedimentação.

Visando-se a definição dos pontos de máximo e mínimo do planejamento, identificou-se uma tendência do aumento da turbidez em dosagens elevadas, fazendo com que não fosse possível medir a velocidade de sedimentação, então a dosagem foi definida entre uma faixa de 50 e 150 g/t.

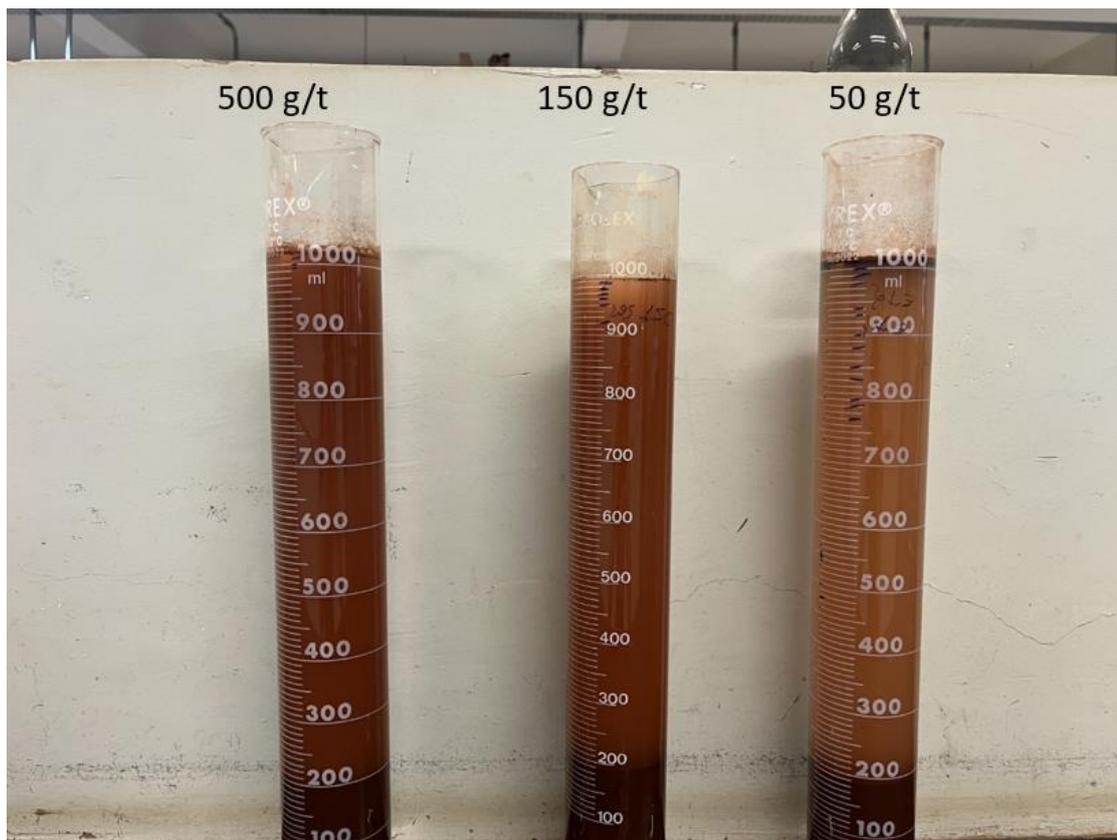


Figura 4.1: Testes preliminares com dosagens de 50, 150 e 500 g/t.

Fonte: Autoral

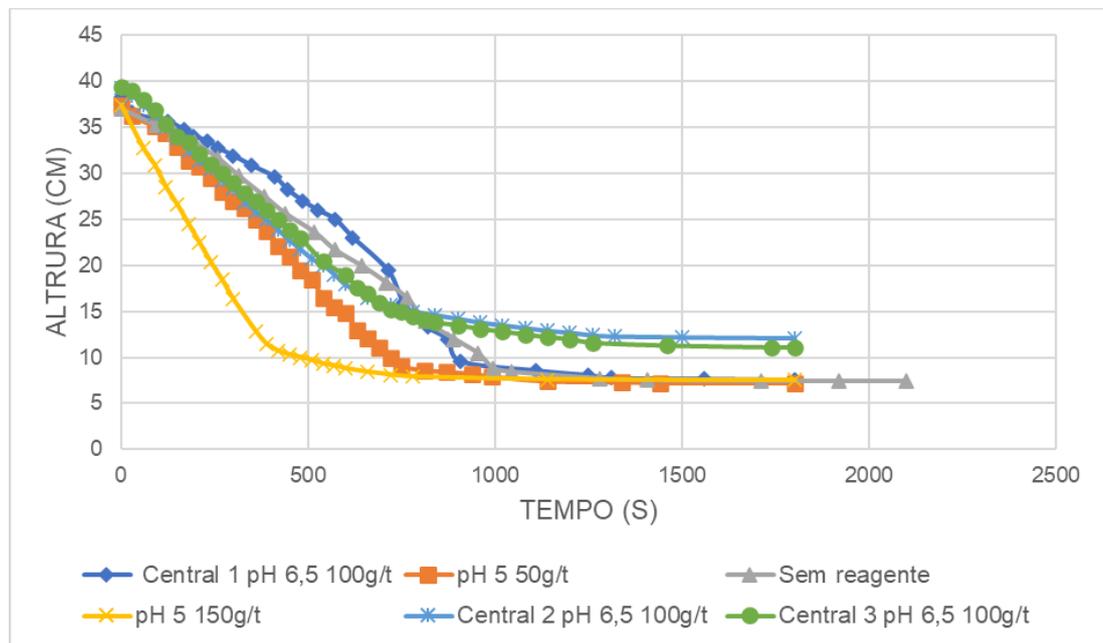
4.2. Testes de sedimentação

A Tabela 4.2 apresenta os resultados de turbidez e velocidade de sedimentação para os testes do planejamento fatorial, com utilização da lecitina de soja. A figura 4.2 mostra as curvas de sedimentação. Os testes 3 e 4 não foram incluídos na figura 4.2, devido à alta turbidez (figura 4.3) não foi possível identificar a interface do clarificado, inviabilizando a coleta de pontos (tempo e altura) para criação da curva de sedimentação desses testes.

A alta turbidez dos testes 3 e 4 se explica, sendo que à medida que o pH aumenta, as superfícies das partículas ficam mais negativas e elas ficam mais dispersas, como ilustrou a figura 2.3 por meio da curva de potencial zeta do quartzo. A Tabela 2.2 mostra que o limite de estabilidade é para potencial zeta de -16mV, cargas mais negativas na superfície das partículas leva a estabilidade da polpa.

Tabela 4.2: Resultados do planejamento fatorial.

Teste	pH	Dosagem (g/t)	Turbidez (FTU)	Vs (m/h)
1	5	50	361	1,37
2	5	150	178	2,16
3	8	50	>1000	1,55
4	8	150	>1000	1,74
5	6,5	100	615	1,13
6	6,5	100	604	0,95
7	6,5	100	609	1,03

**Figura 4.2:** Curvas de sedimentação.

Comparando os testes com lecitina de soja (Tabela 4.2) com o teste sem reagente (Tabela 4.1), vemos que as condições propostas nos testes nos pontos centrais (testes de 5 a 7) não diferenciaram significativamente do teste sem reagente. Enquanto, os testes com modificação de pH atingiram ganhos significativos na velocidade de sedimentação e os testes em meio ácido reduziram a turbidez do clarificado.

A Tabela 4.3 apresenta a comparação das velocidades de sedimentação entre os testes com lecitina de soja e o teste 8 (sem reagente).

Tabela 4.3: Comparativo dos testes oficiais com o teste sem reagente.

Teste	pH	Dosagem (g/t)	Diferença na Vs (%)
1	5	50	34,31%
2	5	150	111,76%
3	8	50	51,96%
4	8	150	70,59%
5	6,5	100	10,78%
6	6,5	100	-6,86%
7	6,5	100	0,98%
8	6,5	0	0,00%

**Figura 4.3:** Teste 3 (dosagem 50g/t e pH 8).

Martins (2022) verificou que a sedimentação do rejeito do minério de ferro, com o floculante Magnafloc 351 na dosagem 120 g/t, resultou em uma velocidade de sedimentação 20,98 m/h e turbidez de 37,9 NTU. Comparando o teste 2, o qual obteve melhor resposta, com o Magnafloc 351, vemos que o floculante sintético é capaz de

atingir uma velocidade de sedimentação de aproximadamente 10 vezes maior que a lecitina de soja. A figura 4.4 ilustra a curva de sedimentação do floculante Magnafloc 351.

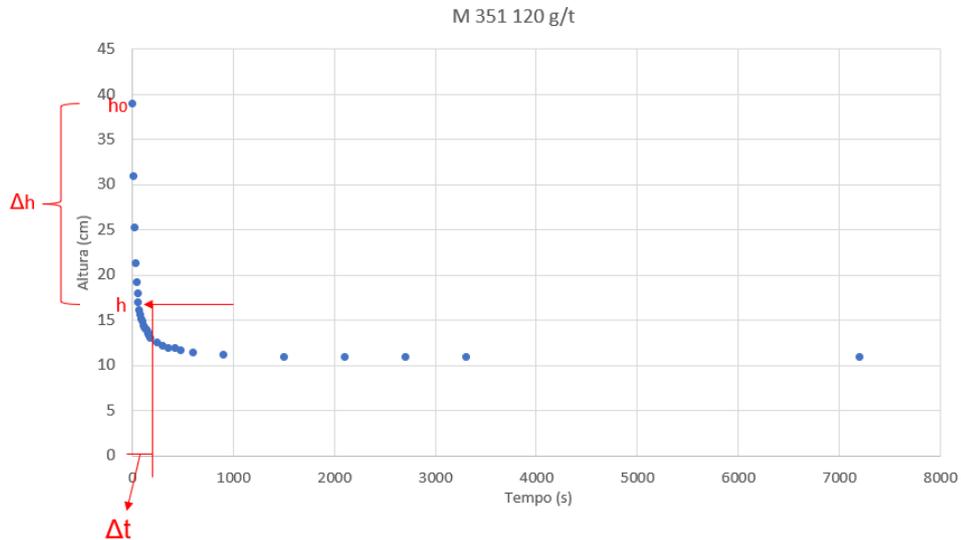


Figura 4.4: Curva de sedimentação Magnafloc 351 com 120 g/t.

Fonte: MARTINS, 2022.

4.3. Análise Estatística

Visando o entendimento do efeito das variáveis no espessamento do rejeito de minério de ferro e a obtenção dos melhores parâmetros operacionais, todos os testes de sedimentação foram interpretados usando o *software* MiniTab.

4.3.1. Velocidade de Sedimentação

A figura 4.5 apresenta o gráfico de Pareto para a velocidade de sedimentação, ele apresenta como as variáveis de entrada (fatores) influenciam nas variáveis de saída (respostas). Ao nível de significância de 5%, apenas a variável dosagem, cuja barra ultrapassa a linha pontilhada, foi significativa na velocidade de sedimentação, para os níveis estudados.

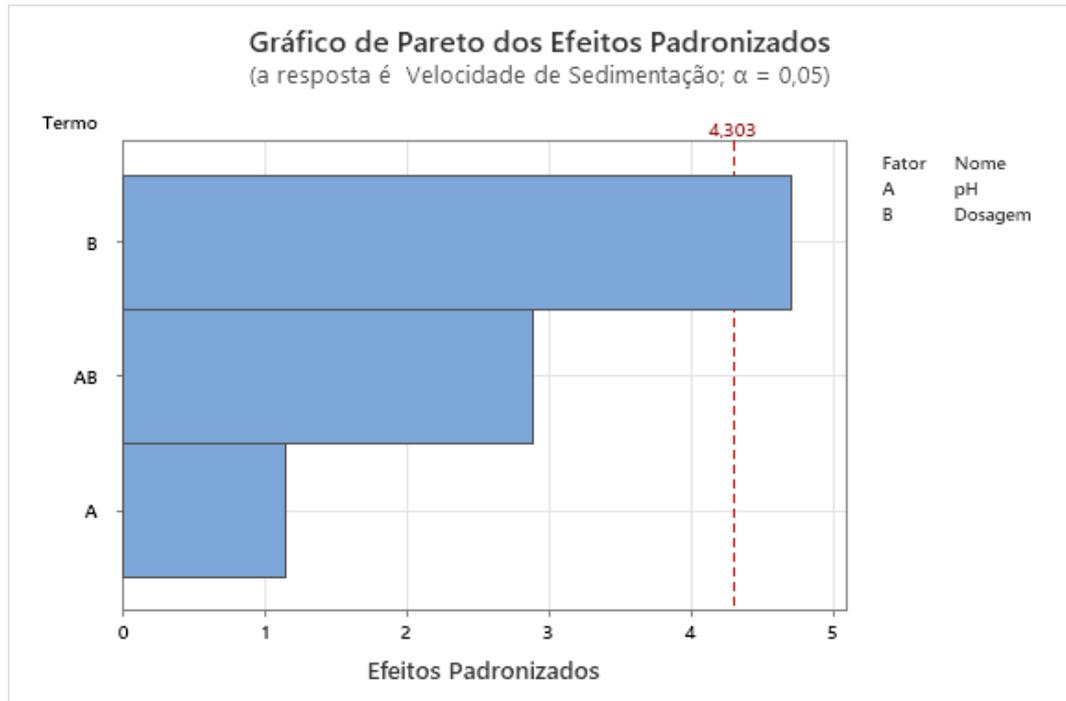


Figura 4.5: Gráfico de Pareto para a velocidade de sedimentação.

O gráfico Normal, representado pela Figura 4.6, representa a influência, positiva ou negativa, dos fatores nas respostas. Comprovou-se novamente, que a dosagem influenciou significativamente na velocidade de sedimentação e de forma positiva, pois está do lado direito da reta. Assim sendo, quando a variável passou do seu nível baixo (50 g/t) para o seu nível alto (150 g/t) aconteceu aumento na velocidade de sedimentação, enquanto, o pH não foi significativo na resposta.

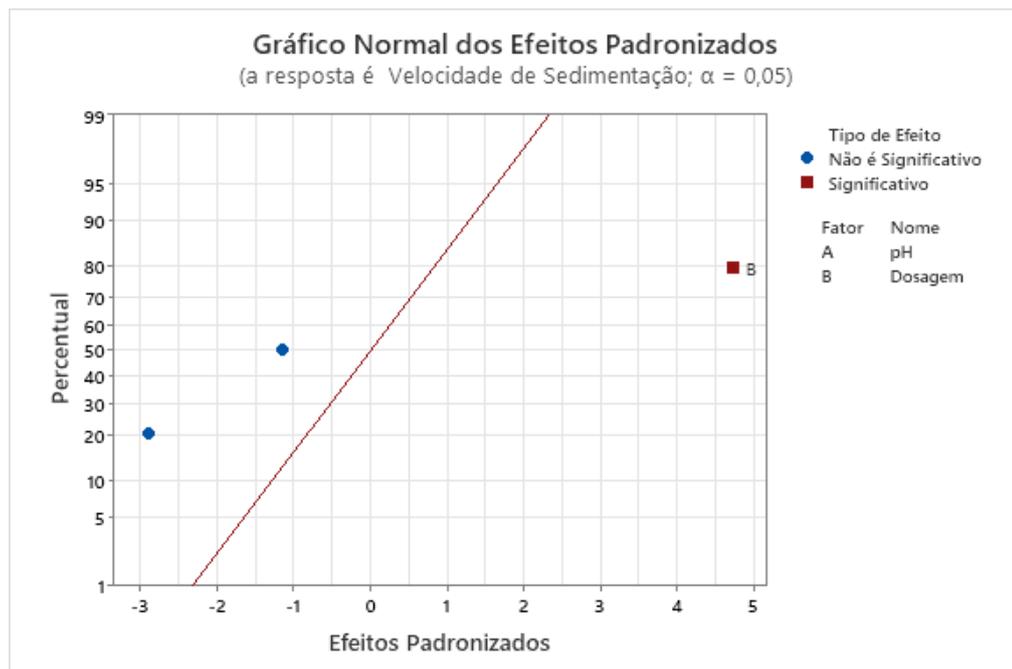


Figura 4.6: Gráfico Normal para a velocidade de sedimentação.

Confirmando a análise estatística, observou-se na Tabela 4.2 que a maior velocidade de sedimentação foi obtida no Teste 2, em que foi realizado em meio ácido (pH 5) e com uma dosagem elevada de reagente (150 g/t). O resultado obtido se justificava, uma vez que o aumento na dosagem de reagente favorece a formação de agregados maiores, e estes se sedimentam em maior velocidade.

4.3.2. Turbidez

O gráfico de Pareto, ilustrado figura 4.7, mostra que ambas variáveis e sua interação influenciam na turbidez, sendo o pH com maior efeito e a dosagem com menor efeito, ao nível de significância de 5%. Analisando-se gráfico Normal, ilustrado pela Figura 4.8, observa-se que o pH foi a variável que mostrou maior efeito positivo na turbidez, seguido pela interação dosagem*pH, enquanto, a dosagem de lecitina de soja apresentou efeito negativo, na faixa testada. Sendo assim, com um aumento da dosagem do nível menor (50g/t) para o nível maior (150g/t) observou-se um aumento na turbidez do clarificado.

Analisando-se a Tabela 4.2, especificamente, a turbidez, vemos que os melhores resultados foram obtidos em meio ácido. Nos testes 1 e 2, realizados com pH 5, obteve-se um ganho significativo com o aumento da dosagem de 50 para 150 g/t, representando uma maior captura das partículas finas com o aumento da dosagem do reagente.

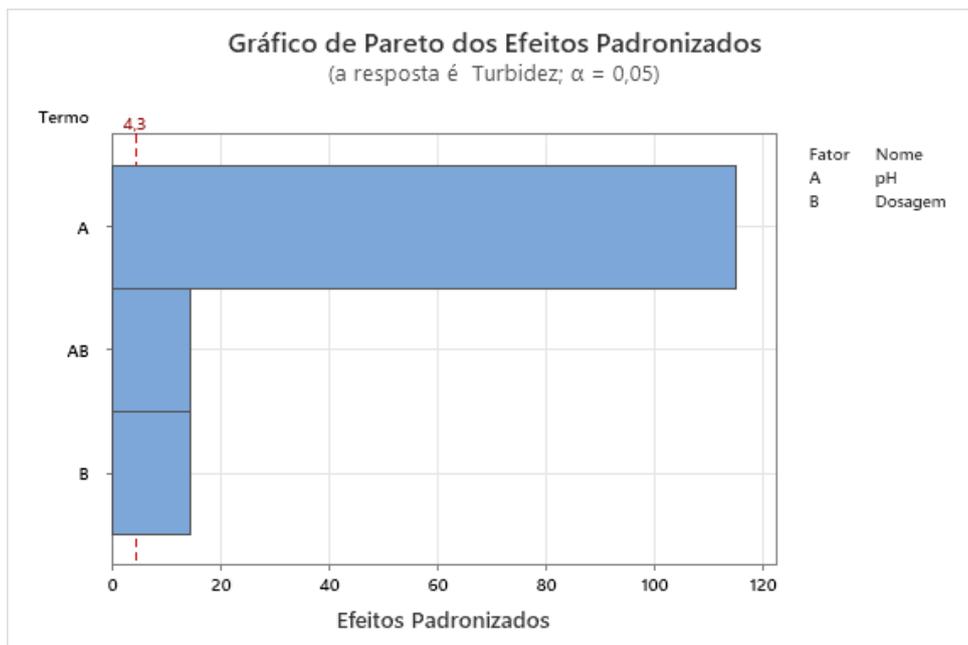


Figura 4.7: Gráfico de Pareto para a turbidez.

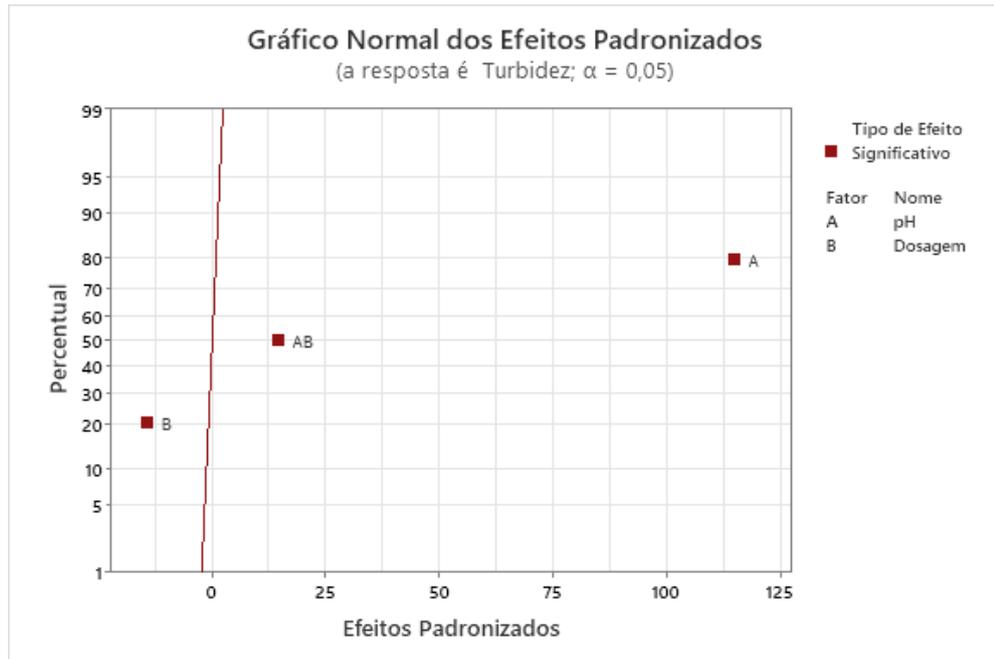


Figura 4.8: Gráfico Normal para a turbidez.

4.3.3. Otimização dos Resultados

Visando a otimização do processo, é necessário analisar as duas variáveis simultaneamente, ou seja, minimizar a turbidez e maximizar a velocidade de sedimentação. A figura 4.9 representa a projeção otimizada pelo MiniTab.

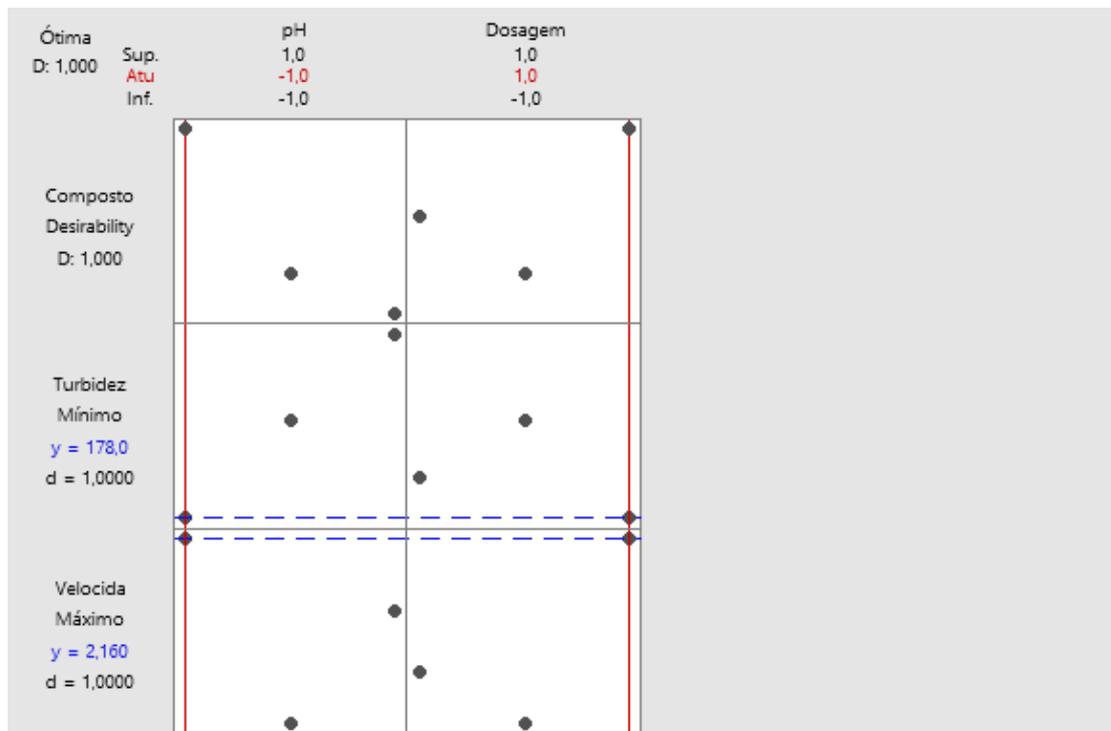


Figura 4.9: Otimização projetada pelo MiniTab.

No processo sugerido, tem-se que o cenário de operação ideal é dosagem máxima (150 g/t) e pH mínimo (5). Representando os valores obtidos no teste 2, onde se obteve velocidade de sedimentação de 2,16 m/h e turbidez de 178 FTU. A figura 4.10 representa o teste 2, similar ao sugerido pelo MiniTab.

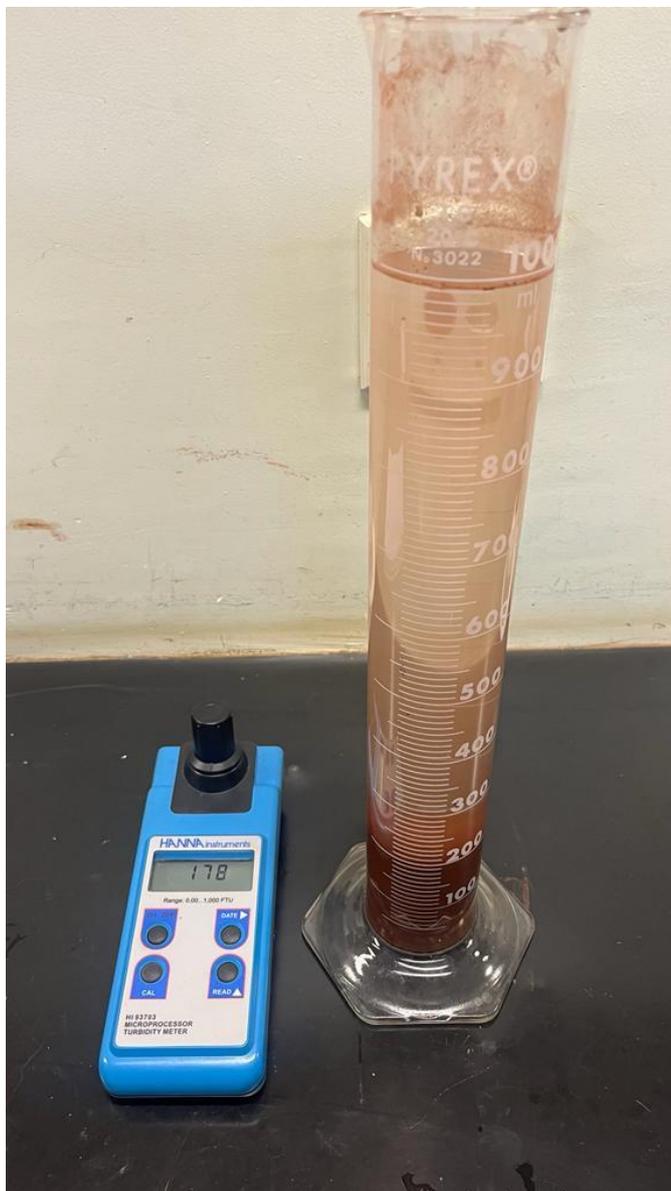


Figura 4.10: Teste 2, dosagem 150g/t e pH 5.

5. Conclusão

O trabalho apresentado teve como objetivo verificar a eficiência da lecitina de soja como reagente agregante no espessamento do rejeito do minério de ferro. Além disso, identificar os efeitos das variáveis, dosagem de lecitina e pH na velocidade de sedimentação e turbidez do clarificado. Após a realização dos testes, verificou-se que a lecitina obteve melhor desempenho, quando atuando em meio ácido (pH 5) e em dosagens menores. Ambas as respostas obtidas, velocidade de sedimentação e turbidez, tiveram como parâmetro operacional ideal o pH 5 e uma faixa de dosagem entre 50 e 150 g/t.

Mostrou-se um reagente bastante eficaz em situações específicas, apresentando um ganho de 70,59% e 111,76% na velocidade de sedimentação para os testes com dosagem máxima (150 g/t) e com pH 8 e 5, respectivamente. Porém, quando comparado com floculantes sintéticos apresenta um desempenho significativamente inferior, no caso, aproximadamente 10 vezes menor.

Contudo, como a turbidez se refere à quantidade de partículas sólidas presentes no clarificado e garantir uma menor turbidez garante com que o clarificado possa ser recirculado, é desejado a obtenção de um valor abaixo de 100 FTU para a turbidez e um pH entre 5 e 9, para que os fluídos possam ser lançados em efluentes, de acordo com o Sistema Integrado de Informação Ambiental. Nenhum dos testes foi capaz de atender a especificação requerida, porém o teste 2 foi o que apresentou menor turbidez, 178 FTU.

Através da análise estatística realizada no MiniTab, observou-se que, para a velocidade de sedimentação, o fator mais impactante foi a dosagem, enquanto que, para a turbidez foi o pH que desempenhou esse papel. No entanto, quando entramos em um cenário de otimização operacional onde avaliamos as duas variáveis simultaneamente, o MiniTab sugeriu para maximizar a velocidade de sedimentação e minimizar a turbidez um cenário de dosagem máxima (150 g/t) e pH mínimo (5), representado pelo teste 2, para o qual obteve velocidade de sedimentação de 2,16 m/h e turbidez de 178 FTU.

4.6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Dentre as futuras possibilidades de desenvolvimento de pesquisas do assunto, podemos destacar:

- Avaliar as variáveis em um outro material (Rejeito fosfático);
- Testar seu desempenho em simultâneo com um outro floculante ou coagulante,
- Estudar seu comportamento variando a porcentagem de sólidos.
- Avaliar o tempo de condicionamento da lecitina com os rejeitos e o grau de agitação.

2.7. Referências Bibliográficas

- BALTAR, C. A. M. **Processos de agregação**. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 559-594.
- BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral para aproveitamento de rejeitos das lamas calcárias e diminuição do impacto ambiental**. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4 ed. ARTMED, 2010. 413p.
- BATISTUZZO J.A.O., ITAYA M., ETO Y., **Formulário médico-farmacêutico**. 4. ed. Pharmabooks, São Paulo, 2011.
- BEI, N. **Otimização do processo de degomagem de óleo de soja por membrana cerâmica**, 2005. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).
- BRAGANÇA, A. C. C. R. **Avaliação de reagentes alternativos para substituição de cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CASTEJON, L. V. **Parâmetros de qualidade na clarificação da lecitina de soja**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- CHAVES, A.P; OLIVEIRA, A.H; CORDEIRO, A.C; CHIAPPA. R. Espessamento. 4ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2013. V2. Cap. 2. P.54-158.
- CUNHA, Maria Virgínia da. **Avaliação da dispersão na deslamagem e flotação de minério fosfático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2022.
- DICKINSON, E. **An Introduction to Food Colloids**. 1ed., Oxford: Oxford University Press, 1992.
- DNPM **Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia. Ferro/Aço**. 2011.
- DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas**, Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2016

- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: Tratamento de minérios. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2010. Cap. 15. P-637-678
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação Sólido- Líquido. Tratamento de Minérios. 4ª edição. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap. 14. P-573-609
- FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. G. Ensaios de sedimentação. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 393-408.
- GADELHA, T. S.; ANDRADE, L. S.; FRANÇA, S. C. A. **Desempenho de flocculantes no desaguamento de polpas de minério de níquel**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 26, 2015, Poços de Caldas. Anais. Poços de Caldas: CETEM/MCT, 2015. p. 398-406.
- GONÇALVES, T. C. **Avaliação da dosagem de coletor na flotação do minério fosfático de Tapira/MG utilizando o planejamento fatorial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.
- GUIMARÃES, F. A. V. **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais**. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- FERREIRA, G.G. **Avaliação da Interferência de Reagente Flocculante na Flotação de Minério Fosfático Ultrafino**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais- Departamento de Engenharia de Minas, 2012.
- HENRIQUES A. A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita**. (Tese de doutorado). UFMG, Belo Horizonte, 2012.
- IBRAM (2011). **Informações e análises da economia mineral brasileira**, 6ª edição. Instituto Brasileiro de Mineração, disponível em <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>.
- LARA, A. F. M. **Espessamento e Transporte de Pasta Mineral**. (Monografia, Especialização, Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- LINS, F, F.; ADAMIAN, R. **Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais**. 2000.

- LOPES, Larissa Moreira. **OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO DE ITATIAIUÇU-MG ARAXÁ/MG 2017**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - CEFET, 2017.
- LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). **Tratamento de Minérios 2010**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- KARLA, F.A. **Efeito da adsorção de surfactantes catiônicos e aniônicos nas propriedades superficiais, reológicas e eletrocinética, de suspensões de bentonita**. Relatório de estágio. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.
- MARTINS, Marina. **EFEITO DE FLOCULANTES NO ESPESSAMENTO E REOLOGIA DE POLPAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**. 2022. Dissertação (Mestre em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2022.
- MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. C. **Química de Superfície na Flotação**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, p. 339-407.
- RESENDE NETO, M. C. de. **Estudo de pastas minerais a partir do espessamento de lamas de processamento fosfático**. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- NIEUWENHUYZEN, W. V. **Lecithin and other phospholipids**. In: KJELLIN, M.; JOHANSSON, I. (Eds.). Surfactants from Renewable Resources. United Kingdom: John Wiley & Sons, p. 191-212, 2010.
- OLIVEIRA, C.; RUBIO, J. **Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, Série Tecnologia Ambiental, n.60, 2011.
- OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e filtração**. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004.
- OMACHI, G.Y. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 83 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2015.
- PAN, Z.; SOMASUNDARAN N. J., TURRO, N. J., STEFFEN, J. **Interactions of cationic dendrimers with hematite mineral**. Colloids and Surfaces A. 2004, p 123–126.

PAIVA, C.T. **Melhoria da Qualidade da Água em Bacias de Decantação Localizadas em Área de Extração de Areia.** (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PIMENTA, L. L. **Metodologia alternativa de otimização das variáveis operacionais em testes de sedimentação para rejeito fosfático.** 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

RAJ, P.V.; NITESH, K.; CHANDRASHEKHAR, H.R.; MALLIKARJUNA-RAO, C.; VENKATA-RAO, J.; UDUPA, N. **Effect of lecithin and silymarin on d-galactosamine induced toxicity in isolated hepatocytes and rats.** Indian Journal of Clinical Biochemistry, v.25, n.2, p.169-174, 2010.

REIS, K.M. **Dimensionamento de espessadores.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

RIDDICK, T. M. 1969. **Control of Emulsion Stability Trough Zeta Potential.** Presented at the Annual Seminar of the Society of Cosmetics Chemists, St. Louis, Missouri.

SALES, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu.** Dissertação de mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

SANTOS, M. A. **O problema da água recirculada para a flotação de apatita: a flotação por ar dissolvido como alternativa ao tratamento de efluente mineral visando ao reuso e à melhoria do processo de concentração de fosfato.** (Tese de doutorado). Faculdade de Engenharia Química. UFU, Uberlândia 2013.

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

STOPPER, H. R.; SAFFER, B. A.; BAUER, S. T. **Factors Influencing the determination of the acetone insolubles of commercial lecithins.** AOCS, p. 408–413, 1953. lecithins. JAOCS, p. 408–412, 1953.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros: fração Sinter Feed.** Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VIEIRA, B. A. **Concentração via jigagem do minério de ferro do depósito Jambreiro, Guanhães**. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. de. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.