



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Paloma Paula Gomes Cipriano

**COMPARAÇÃO ENTRE COAGULANTES NO ESPESAMENTO E ANÁLISE DA
APLICAÇÃO DA ÁGUA CLARIFICADA NA FLOTAÇÃO DE UM MINÉRIO DE
FERRO ITABIRÍTICO**

**Ouro Preto - MG
2025**

Paloma Paula Gomes Cipriano

**COMPARAÇÃO ENTRE COAGULANTES NO ESPESAMENTO E ANÁLISE DA
APLICAÇÃO DA ÁGUA CLARIFICADA NA FLOTAÇÃO DE UM MINÉRIO DE
FERRO ITABIRÍTICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada ao Curso de Engenharia Minas da
Escola de Minas da Universidade Federal de
Ouro Preto como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro de Minas.

Área de concentração: Tratamento de minérios.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Érica Linhares Reis.

**Ouro Preto - MG
2025**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paloma Paula Gomes Cipriano

COMPARAÇÃO ENTRE COAGULANTES NO ESPESSAMENTO E ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA ÁGUA CLARIFICADA NA FLOTAÇÃO DE UM MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 04 de novembro de 2025

Membros da banca

Dr^a. Érica Linhares Reis - Orientadora - DEMIN/UFOP

Dr^a. Francielle Câmara Nogueira - Membro- DEMIN/UFOP

Dr. Flávio Luiz Martins - Membro - DEMIN/UFOP

Érica Linhares Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/11/2025



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/11/2025, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1021520** e o código CRC **82212966**.

Dedico este trabalho à memória do meu avô Nêgo e aos meus pais, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança em todos os momentos desta jornada acadêmica.

Aos meus pais e aos meus irmãos, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo diário, fundamentais para a realização deste sonho. Ao meu esposo, Janciander Diniz Lopes, pelo companheirismo, paciência e compreensão em cada etapa desta caminhada.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Érica Linhares Reis, agradeço pela dedicação, orientação precisa e pelos valiosos ensinamentos que contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento deste trabalho e para a minha formação profissional.

À gloriosa Escola de Minas e ao DEMIN – Departamento de Engenharia de Minas da UFOP, manifesto minha gratidão por todo conhecimento, estrutura e oportunidades que tornaram possível a minha formação.

Às amigadas que construí ao longo desses cinco anos, meu sincero agradecimento pela parceria, apoio e por tornarem essa trajetória mais leve e significativa.

E, por fim, a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e caminhada acadêmica, deixo registrados meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O beneficiamento de minério de ferro depende de operações que garantem eficiência e reutilização da água, como o espessamento. Nesse processo, a escolha do coagulante influencia diretamente a sedimentação e a clarificação da água. Diante disso, este estudo compara o desempenho da cal virgem e do cloreto de amônio na etapa de espessamento de lamas e na qualidade da água clarificada utilizada na flotação de minério de ferro itabirítico. A pesquisa foi motivada por demandas observadas durante meu estágio, onde surgiu a necessidade de avaliar alternativas mais eficientes e sustentáveis. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais de sedimentação em provetas, seguidos de testes de flotação reversa utilizando a água obtida com cada coagulante. Através dos experimentos realizados, observou-se que o cloreto de amônio apresentou melhor desempenho nos testes de sedimentação em provetas, com velocidade média de sedimentação de 12,3 cm/min, frente a 4,1 cm/min obtidos com a cal. O teor de sólidos no sedimento também foi superior (44,7% contra 40,2%). Em relação à qualidade do sobrenadante, o cloreto de amônio resultou em turbidez de 36,6 NTU, significativamente inferior aos 154,7 NTU observados com a cal virgem, além de apresentar eficiência mesmo em dosagem três vezes menor. Nos testes de flotação, o uso da água clarificada gerada por ambos os coagulantes resultou em recuperação metalúrgica média semelhante: 88,7% para o cloreto de amônio e 89,5% para a cal, demonstrando ausência de impactos negativos no processo. Assim, o cloreto de amônio mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável à cal virgem no tratamento de lamas e na recirculação da água de processo. No entanto, recomenda-se a continuidade da pesquisa com uma análise comparativa de custos, visando avaliar a viabilidade econômica de sua aplicação em escala industrial.

Palavras-chave: coagulantes, sedimentação, flotação, minério de ferro, recirculação de água.

ABSTRACT

The beneficiation of iron ore depends on operations that ensure process efficiency and water reuse, such as thickening. In this stage, the choice of coagulant directly influences particle settling and water clarification. In this context, this study compares the performance of quicklime and ammonium chloride in the thickening of iron ore slimes and in the quality of the clarified water used in the flotation of itabirite ore. The research was motivated by demands observed during my internship, which highlighted the need to evaluate more efficient and sustainable alternatives. Laboratory sedimentation tests were carried out in graduated cylinders, followed by reverse flotation tests using the water obtained with each coagulant. The results showed that ammonium chloride presented superior performance in sedimentation, with an average settling rate of 12.3 cm/min compared to 4.1 cm/min obtained with quicklime. The solid content in the sediment was also higher (44.7% versus 40.2%). Regarding supernatant quality, ammonium chloride produced a turbidity of 36.6 NTU, significantly lower than the 154.7 NTU observed with quicklime, while requiring a dosage three times smaller. In the flotation tests, the clarified water from both coagulants resulted in similar metallurgical recoveries: 88.7% for ammonium chloride and 89.5% for quicklime, indicating no negative impact on the process. Therefore, ammonium chloride proved to be a technically viable alternative to quicklime for slime treatment and process water recirculation. However, further studies including a comparative cost analysis are recommended to assess its economic feasibility on an industrial scale.

Keywords: coagulants, sedimentation, flotation, iron ore, water recirculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do ensaio de sedimentação em provetas e regiões formadas durante a sedimentação_____	16
Figura 2 – Curva de Sedimentação_____	17
Figura 3 – Diagrama de especiação do cálcio ($[Ca^{2+}] = 10^{-3} \text{ mol/L}$; $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) _____	21
Figura 4 – Estrutura molecular do cloreto de amônio _____	23
Figura 5 – Mecanismo simplificado de floculação dado por formação de pontes_____	24
Figura 6 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa, resultando na reversão localizada de carga _____	25
Figura 7 – Desenho esquemático de uma coluna de flotação _____	27
Figura 8 – Provetas no início dos testes de sedimentação _____	34
Figura 9 – Provetas ao longo dos testes de sedimentação _____	34
Figura 10 – Fluxograma representando os testes de flotação _____	35
Figura 11 – Ensaio de flotação reversa de minério de ferro utilizando a água recuperada dos ensaios de sedimentação em proveta com os diferentes coagulantes _____	36
Figura 12 – Curva de Sedimentação para o coagulante A e coagulante B _____	38
Figura 13 – Comparativo dos resultados dos ensaios de cinética de flotação, utilizando a água clarificada pela ação da cal virgem calcítica e do cloreto de amônio_____	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais coagulantes e faixa de pH utilizada no tratamento de água e beneficiamento de minério de ferro _____	19
Tabela 2 – Floclulantes mais utilizados para aplicação da industria mineral _____	26
Tabela 3 – Planejamento dos testes de sedimentação em proveta _____	33
Tabela 4 – Resultados obtidos da cinética de flotação utilizando a água clarificada com a cal virgem _____	40
Tabela 5 – Resultados obtidos da cinética de flotação utilizando a água clarificada com o cloreto de amônio _____	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Processo de beneficiamento do minério de ferro em estudo	13
3.2	Separação sólido – líquido	14
3.2.1	Sedimentação	15
3.2.2	Agentes Auxiliares	18
3.2.2.1	Coagulantes	18
3.2.2.2	Cal	20
3.2.2.3	Cloreto de amônio	22
3.2.2.4	Floculantes	23
3.3	Flotação	26
3.3.1	Amina	28
3.3.2	Amido de Milho	28
3.3.3	Reguladores de pH	28
3.4	Água de recirculação na flotação	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Materiais	32
4.2	Amostragem	32
4.3	Ensaio de Sedimentação	32
4.4	Ensaio de Flotação – Recuperação Mássica e Metalúrgica	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Ensaio de Sedimentação em Proveta	37
5.2	Ensaio de Flotação – Recuperação Mássica e Metalúrgica	40
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O beneficiamento de minérios de ferro é um processo essencial para a indústria mineral brasileira, responsável por transformar o minério bruto extraído da mina em um produto de alto teor metálico e adequado às etapas subsequentes, como a pelotização e a siderurgia. Dentro desse contexto, as operações de concentração e separação sólido-líquido desempenham papel fundamental, pois garantem a eficiência do processo e contribuem diretamente para a redução do consumo de água e para a sustentabilidade das plantas de beneficiamento (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Dentre as etapas do circuito de beneficiamento, o espessamento tem como finalidade principal a separação entre as fases sólida e líquida, permitindo tanto o adensamento do material sólido quanto a clarificação da água, que pode ser reaproveitada nas demais etapas do processo. A eficiência dessa operação depende de diversos fatores, como o tamanho das partículas, a densidade da polpa e, principalmente, o tipo e a dosagem dos reagentes utilizados na coagulação e floculação das partículas finas (CHAVES, 2009; PERES; COELHO; ARAÚJO, 1980).

Historicamente, a cal tem sido o reagente mais empregado na indústria mineral para promover a neutralização de cargas e a aglomeração de partículas, facilitando a sedimentação e a clarificação da água. Com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de novos reagentes, surgiram alternativas capazes de otimizar o processo de sedimentação e reduzir o impacto ambiental associado ao consumo de cal.

Entre essas alternativas, destaca-se o cloreto de amônio, um coagulante de caráter catiônico que atua na neutralização de partículas carregadas negativamente, favorecendo a formação de flocos mais densos e estáveis. Esse tipo de reagente vem sendo estudado por apresentar boa eficiência em baixas dosagens e por contribuir para a melhoria da clarificação da água de processo, o que o torna uma potencial alternativa técnica à cal virgem tradicionalmente utilizada em usinas de beneficiamento de minério de ferro.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo comparar o desempenho da cal virgem calcítica e do cloreto de amônio na etapa de espessamento de lamas e na análise da aplicação da água clarificada na flotação de minério de ferro itabirítico. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais de sedimentação em provetas e flotação reversa utilizando a água obtida com cada coagulante, buscando analisar parâmetros como velocidade de sedimentação, teor de sólidos no sedimento, turbidez da água clarificada e desempenho metalúrgico da flotação.

A escolha deste tema foi motivada pelas atividades desenvolvidas durante o meu estágio, período em que surgiu, junto aos engenheiros da área, a necessidade de avaliar alternativas ao uso convencional da cal no processo de espessamento. A possibilidade de comparar diferentes coagulantes mostrou-se relevante tanto para melhorar a eficiência operacional quanto para contribuir com práticas mais sustentáveis no uso da água de processo, o que reforçou a importância da realização deste estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar a ação dos coagulantes cal virgem e do cloreto de amônio na separação sólido líquido de lamas e analisar a aplicação da água clarificada na flotação de um minério de ferro itabirítico.

2.2 Objetivos Específicos

Analisar a aplicação da cal e do cloreto de amônio no espessamento de lamas, através de testes de sedimentação em proveta;

Avaliar o impacto do uso da água clarificada na etapa de flotação;

Comparar os resultados obtidos do cloreto de amônio com o atualmente utilizado, a cal virgem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de beneficiamento do minério de ferro em estudo

O minério de ferro deste estudo é composto majoritariamente pelos minerais: hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita (FeO.OH), siderita (FeCO_3) e sílica (SiO_2). O ROM – (*Run Of Mine*) que é o minério extraído da mina, é dividido em várias operações unitárias até obter-se o concentrado de ferro final.

Inicialmente o ROM passa pelo sistema a seco, na qual é realizado a britagem e o peneiramento, para classificar e reduzir o tamanho das partículas do minério até atingir tamanho $<12,5$ mm.

O material na granulometria ideal alimenta a moagem primária que tem a função de cominuir e fragmentar as partículas minerais e é nessa operação unitária que se inicia o processo de concentração a úmido. O objetivo dessa etapa é de garantir que 90% do material seja reduzido de uma granulometria abaixo de $0,150$ mm. Desta forma, garante que o material esteja liberado e adequado para as etapas posteriores de deslamagem e flotação.

O minério $<0,150$ mm segue para a etapa unitária da deslamagem que é responsável por eliminar as partículas ultrafinas (<10 μm), nocivas para o processo de flotação. Essa classificação é realizada nos hidrociclones.

O produto denominado lama alimenta o espessador de lama. O produto da deslamagem denominada de finos alimenta a flotação de finos. Já as partículas mais grossos, alimenta a flotação de grossos.

A flotação realizada é a catiônica reversa, ou seja, se flota o material que não tem valor econômico que é a sílica (SiO_2) e deprime os óxidos de ferro. Na flotação é alimentado um material com um teor de aproximadamente 40 a 43% de ferro e é entregue um concentrado final de aproximadamente 66% de ferro e também se tem a sílica ideal para o processo seguinte que seria na formação das pelotas.

Para que ocorra a flotação é necessário adicionar alguns reagentes como o amido (depressor), amina (coletor e espumante) e soda (regulador de pH). Esses reagentes tem como função de conferir características distintas na superfície dos minérios de ferro e do quartzo.

A partir do fim dessa etapa já se tem o material do concentrado e o rejeito, que alimenta o espessador de rejeito e posteriormente é direcionado para a filtragem.

O concentrado obtido na flotação é encaminhado para a moagem secundária (remoagem) em conjunto com baterias de hidrociclones para realizar a classificação das partículas minerais em duas etapas. A primeira é para retirar a fração granulométrica mais

fina que não tem necessidade de ser remoída e a segunda realiza a reclassificação das partículas minerais após o processo de remoagem. Na moagem secundária o concentrado é reduzido de $<0,150$ mm para 88% aproximadamente $<0,044$ mm.

A remoagem tem como principal objetivo adequar a granulometria das partículas minerais para a etapa final de concentração (flotação de limpeza), garantindo também que o material possa ser bombeado com segurança pelo mineroduto e apresente a granulometria adequada para o processo de pelotização. Após essa etapa, a polpa segue para a flotação de limpeza, onde é obtido o concentrado final. Essa flotação é essencial para ajustar a qualidade do concentrado destinado à pelotização; ao término do processo, o material flotado é encaminhado ao espessador de concentrado e, posteriormente, ao mineroduto.

Os produtos gerados (lama, rejeito e concentrado), são encaminhados para os espessadores de lama, rejeito e concentrado respectivamente.

No espessador de lama é adensado a lama com cerca de 38% de sólidos que veio da etapa da deslamagem dos hidrociclones.

O espessamento é uma etapa de operação unitária do beneficiamento de separação sólido/líquido. Funciona com base na velocidade de sedimentação das partículas e possuem três objetivos específicos:

1. Adensar os sólidos, adequando esses sólidos para as próximas etapas;
2. Clarificar a água com a menor quantidade de sólidos possível;
3. Recircular a água, visando a sustentabilidade. Sendo que cerca de 89% da água recirculada dos espessadores retorna para o concentrador como água de processo.

3.2 Separação sólido – líquido

Conforme apontado por Luz, Sampaio e França (2010), as etapas de separação entre sólidos e líquidos assumem papel estratégico no processo de beneficiamento mineral. Nesses processos, é fundamental atingir dois objetivos principais: obter um resíduo sólido com baixo teor de umidade e um líquido com elevado grau de clarificação.

A seleção dos equipamentos utilizados na separação sólido-líquido depende diretamente da capacidade de processamento exigida. Quando se trata de operações com menor demanda de alimentação e produção, costuma-se adotar a filtragem, seja de forma contínua ou em batelada, como a alternativa mais apropriada. Já em situações que exigem

maior capacidade operacional, o espessamento é, em geral, a opção mais viável (Luz, Sampaio e França, 2010).

É importante considerar que, quanto menor o tamanho das partículas presentes na polpa a ser tratada, menores tendem a ser tanto a eficiência quanto a capacidade do processo de separação, além de se restringirem as opções de equipamentos disponíveis (Luz, Sampaio e França, 2010).

Quando se trata de suspensões ou polpas minerais com partículas extremamente finas em especial aquelas com diâmetro inferior a 10 μm , e ainda mais na fração de argilas, com menos de 2 μm , a eficiência da separação sólido-líquido tende a ser significativamente comprometida. Esse desempenho reduzido está associado ao efeito de dispersão causado pelo movimento browniano típico de partículas coloidais, que dificulta a sedimentação. Diante desse cenário, torna-se necessário recorrer a técnicas de aglomeração prévia, como a coagulação e a floculação, para melhorar a eficiência do processo. Esses mecanismos, promovem a desestabilização das partículas finas em suspensão, facilitando a formação de aglomerados maiores e, conseqüentemente, otimizando a separação entre as fases sólida e líquida (Luz, Sampaio e França, 2010).

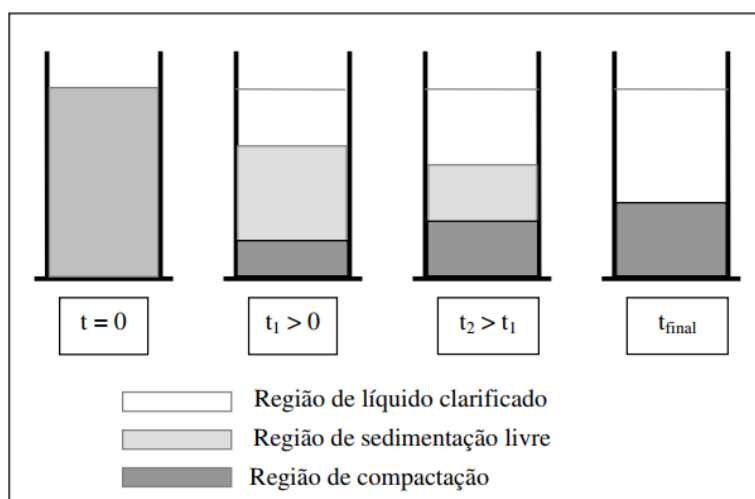
3.2.1. Sedimentação

A separação sólido-líquido por sedimentação baseia-se nas diferenças de densidade entre os componentes presentes em uma suspensão. Nesse processo, as partículas sólidas são removidas da fase líquida por meio da força gravitacional, o que contribui para uma operação simples e de baixo custo (Luz, Sampaio e França, 2010). De acordo com a literatura técnica, os equipamentos utilizados nesse tipo de separação podem ser agrupados em duas categorias principais: clarificadores e espessadores. Os clarificadores têm como finalidade principal a obtenção de um líquido com baixa quantidade de sólidos em suspensão, enquanto os espessadores são projetados para concentrar os sólidos, resultando em um produto final mais denso (Chaves *et al.*, 2004).

A sedimentação ocorre a partir de fenômenos relacionados ao transporte de partículas, em que os sólidos em suspensão são influenciados por forças como a gravidade, o empuxo e a resistência ao seu deslocamento. Para compreender melhor os aspectos envolvidos na operação contínua, é comum utilizar o ensaio de sedimentação em proveta, que permite observar o comportamento da suspensão ao longo do tempo por meio da movimentação da interface superior, conforme ilustra a Figura 1. Neste teste é possível observar a formação de

três zonas bem definidas: uma camada de líquido já clarificado, uma região intermediária onde ocorre a sedimentação propriamente dita, e uma zona inferior caracterizada pela compactação das partículas (Luz, Sampaio e França, 2010).

Figura 1 – Etapas do ensaio de sedimentação em provetas e regiões formadas durante a sedimentação



FONTE: (Luz *et al.*, 2004)

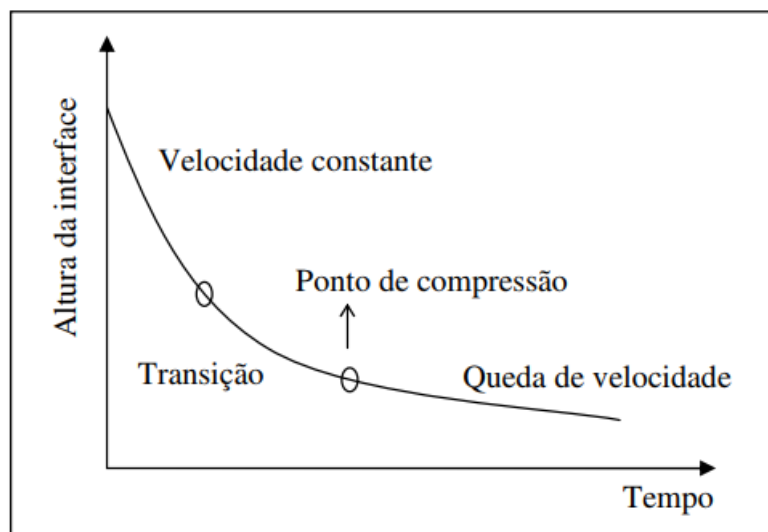
Na etapa de sedimentação livre, as partículas se deslocam individualmente, sem que haja interferência mútua, mantendo-se constantes tanto a velocidade de queda quanto a concentração dos sólidos em suspensão. Já na zona de compactação, ocorre o início da interação entre as partículas, o que leva a uma desaceleração progressiva do movimento de sedimentação e a uma variação na concentração de sólidos ao longo dessa região (Bragança, 2008).

No início do ensaio, a suspensão se apresenta uniformemente distribuída, com concentração de sólidos constante ao longo de toda a altura da proveta. À medida que o tempo avança, as partículas de maior porte e densidade iniciam o processo de sedimentação, formando, no fundo do recipiente, uma camada inicial correspondente à zona de compactação. Essa região é composta predominantemente por sólidos mais pesados, que apresentam maior velocidade de decantação. Logo acima, desenvolve-se uma zona intermediária onde partículas mais finas descem lentamente, sem que haja interação significativa entre elas, caracterizando a chamada sedimentação livre, na qual a concentração de sólidos permanece praticamente inalterada. Conforme esse processo prossegue, forma-se gradualmente uma camada superior de líquido clarificado, livre de partículas em suspensão (Bragança, 2008).

Ao longo do experimento, é possível observar modificações nas alturas das diferentes zonas formadas na suspensão. Com o tempo, as regiões correspondentes ao líquido clarificado e à compactação tendem a se expandir, enquanto a zona de sedimentação livre vai progressivamente desaparecendo. Em determinado momento, restam apenas duas regiões distintas: uma composta pelos sólidos compactados no fundo e outra contendo o líquido já separado na parte superior. A partir desse estágio, o processo passa a ser caracterizado por uma compactação mais lenta dos sólidos, promovendo a liberação do líquido retido entre as partículas, que migra para a região do líquido clarificado. Esse rearranjo das partículas sólidas, causado pela expulsão do líquido, pode ser percebido pela leve redução na altura da zona de compactação (Luz, Sampaio e França, 2010).

Com base nos valores registrados da altura da interface ao longo do tempo, é possível construir curvas representativas do processo de sedimentação, conforme ilustrado na Figura 2. A análise dessas curvas permite a determinação de parâmetros importantes, como a velocidade inicial de sedimentação e a altura correspondente ao início da compactação dos sólidos, entre outros.

Figura 2 – Curva de Sedimentação



FONTE: (Valadão, 2008)

As curvas que descrevem o comportamento da sedimentação geralmente apresentam três etapas distintas: uma fase inicial com velocidade constante, seguida por uma zona de transição e, por fim, uma fase em que ocorre a diminuição da velocidade devido à compactação dos sólidos. Para o cálculo da velocidade de sedimentação, considera-se apenas o trecho inicial da curva, no qual a inclinação se mantém constante. A identificação dos

pontos de transição entre essas etapas fornece dados relevantes para o projeto e dimensionamento de espessadores (Valadão, 2008).

3.2.2. Agentes Auxiliares

3.2.2.1. Coagulantes

A coagulação é uma etapa fundamental nos processos de tratamento de água e no beneficiamento de minérios, como o minério de ferro. Ela consiste na adição de substâncias químicas, denominadas coagulantes, que promovem a desestabilização das partículas em suspensão, facilitando sua agregação e posterior remoção por sedimentação ou filtração.

Coagulantes são substâncias eletrolíticas que possuem carga contrária à das superfícies das partículas em suspensão. Ao serem adicionados ao meio, favorecem a neutralização dessas cargas, permitindo que as partículas se aproximem e se agrupem, impulsionadas pelas forças de atração molecular (Oliveira *et al.*, 2004).

A coagulação resulta da atuação, seja isolada ou simultânea, de quatro diferentes mecanismos. a) compressão da dupla camada elétrica; b) adsorção e neutralização de carga; c) varredura; d) adsorção e formação de ponte (Di Bernardo; Dantas, 2005):

(a) Compressão da Dupla Camada Elétrica

Esse mecanismo baseia-se na adição de eletrólitos, geralmente sais, que reduzem a repulsão eletrostática entre partículas coloidais. A coagulação acontece devido à compressão da dupla camada elétrica, promovida pela adição de íons inorgânicos. Esses íons se adsorvem no plano de cisalhamento sólido-líquido, conhecido como plano Zeta, o que neutraliza o potencial elétrico, diminui as forças de repulsão entre as partículas e favorece a atuação das forças de atração, resultando na agregação das partículas.

(b) Adsorção e Neutralização de Carga

A coagulação ocorre quando os coagulantes se fixam diretamente na superfície das partículas, eliminando suas cargas elétricas. Uma vez neutralizadas, as partículas deixam de se repelir, tornando possível sua aglomeração. Esse processo é muito comum no uso de coagulantes orgânicos, como aminas, ou inorgânicos, como sais de alumínio e ferro. A adsorção é eficiente, independentemente da quantidade de partículas presentes, e é bastante aplicada em processos que utilizam filtração direta, sem necessidade de decantação.

(c) Varredura

Esse mecanismo ocorre quando há dosagem elevada de coagulantes, levando à formação de precipitados insolúveis, como hidróxidos metálicos ($\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$).

Esses precipitados capturam as partículas presentes na água, incorporando-as em sua estrutura. Esse tipo de coagulação é muito utilizado quando se busca produzir flocos maiores e mais densos, que se sedimentam ou flutuam com facilidade, facilitando etapas subsequentes de tratamento, como floculação, decantação ou flotação.

(d) Adsorção e Formação de Pontes

O mecanismo de adsorção com formação de pontes acontece quando são utilizados polímeros com cadeias moleculares muito longas (massa molar superior a 10^6). Esses polímeros se ligam à superfície de algumas partículas e, ao mesmo tempo, conseguem se conectar a outras ao redor, funcionando como uma espécie de elo que promove a união entre elas.

No beneficiamento do minério de ferro, a aplicação adequada dos coagulantes é essencial para a clarificação da água de processo, remoção de finos e melhora da eficiência das etapas subsequentes.

A escolha do coagulante e o controle da faixa de pH são determinantes para o sucesso do processo, visto que influenciam diretamente na eficiência da aglutinação das partículas. A Tabela 1 apresenta os principais coagulantes utilizados no tratamento de água e no beneficiamento de minério de ferro, destacando suas características e faixas de pH usuais de aplicação.

Tabela 1 – Principais coagulantes e faixa de pH utilizada no tratamento de água e beneficiamento de minério de ferro

Coagulante	Faixa de pH Usual
Sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	5,5 – 7,5
Cloreto de alumínio (AlCl_3)	5 – 7
Cloreto férrico (FeCl_3)	4 – 9
Sulfato ferroso (FeSO_4)	5 – 7
Polímeros orgânicos (poliacrilamidas catiônicas, aniônicas e não iônicas)	Variável, depende do tipo de polímero
Cal (CaO) / Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	Eleva pH (8-11)
KLARAD PC1193 N,N-Dimetil-N-2- propenil-2-propen-1- homopolímero de cloreto de amônio	5,8 – 6

FONTE: Adaptado de (Bratby, 1980), (Ravina, 1993), (Adamson, 1990) e (Piantá UFRGS, 2008)

3.2.2.2. Cal

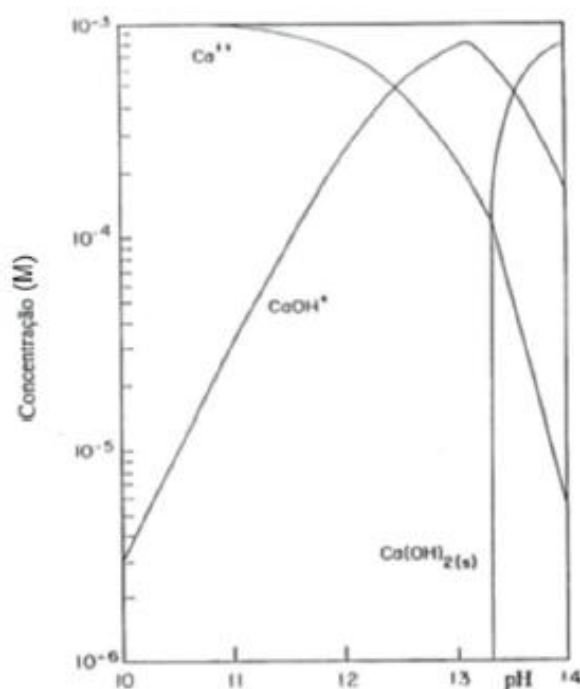
De acordo com Bragança (2008), a cal é um material de origem mineral obtido a partir da transformação térmica de rochas ricas em carbonato, como o calcário, o dolomito e o calcário magnesiano. Esse processo resulta em seis tipos principais de produtos, podendo ou não passar por hidratação. São eles: cal virgem cálcica (óxido de cálcio – CaO), cal cálcica hidratada (hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2), cal dolomítica virgem (mistura de óxidos de cálcio e magnésio – $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$), cal dolomítica hidratada tipo N (que reúne hidróxidos de cálcio e magnésio, além de óxido de magnésio – $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$), cal dolomítica hidratada tipo S (apenas os hidróxidos – $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$) e, por fim, a cal hidráulica.

A chamada cal virgem é produzida por meio da decomposição térmica de substâncias carbonatadas. Quando essa decomposição ocorre a partir de materiais puros, como calcários brancos, o produto final tende a apresentar cor clara e uniforme. No entanto, a presença de colorações como o cinza claro, o amarelo ou o creme pode indicar a existência de impurezas no material de origem (Bragança, 2008).

Devido à sua ampla aplicabilidade, tanto a cal virgem quanto a hidratada são intensamente consumidas em nível mundial. Esse elevado consumo está relacionado à sua presença em diversas áreas industriais evidenciando a importância desse composto em processos produtivos variados (Bragança, 2008).

A adição de cal hidratada à polpa de minério de ferro tem como finalidade ajustar as condições de dispersão do sistema. Ao reagir com a água, a cal origina hidróxido de cálcio, que se dissocia liberando íons capazes de modificar o pH do meio. A presença de espécies iônicas como Ca^{2+} e CaOH^+ interfere diretamente no comportamento de dispersão das partículas minerais. Na Figura 3 é mostrado um diagrama de especiação do cálcio, para uma concentração específica.

Figura 3 – Diagrama de especiação do cálcio ($[Ca^{2+}] = 10^{-3} \text{ mol/L}$; $T = 25^\circ \text{C}$)



FONTE: (Fuerstenau e Palmer, 1976) apud (Souza, 2014)

De acordo com Pearse (2003), a cal desempenha papel relevante no beneficiamento mineral, atuando tanto como agente coagulante quanto na regulação do pH. Sua aplicação promove a depressão de sulfetos de ferro e contribui para a manutenção do cianeto em meio cáustico por meio da remoção de íons carbonato. Historicamente, a cal tem se destacado nos processos que envolvem suspensões com alta concentração de sólidos. Já em sistemas de baixa concentração, como no tratamento de drenagens de mina, os sais de alumínio e de ferro têm sido preferencialmente utilizados, em virtude da sua hidrólise natural, que gera espécies oligoméricas de elevada carga positiva, favorecendo a coagulação.

O uso da cal nas indústrias químicas e minero-metalúrgicas é bastante amplo, abrangendo setores como a siderurgia, a produção de metais não ferrosos, a fabricação de produtos químicos, o tratamento de efluentes e abastecimento de água, além de sua presença em formulações de tintas, borrachas, óleos e reagentes voltados à remoção de óxidos de enxofre (SOx). Além do setor industrial, esse insumo também é largamente empregado na construção civil, nas práticas agrícolas, em aplicações relacionadas à saúde pública e até mesmo em atividades domésticas. Dada essa versatilidade, estima-se que a cal seja utilizada em quase uma centena de finalidades distintas (Guimarães, 2002).

3.2.2.3. Cloreto de amônio

Os polímeros, em especial os sintéticos de caráter catiônico, têm ganhado destaque no tratamento de água para abastecimento, sendo aplicados tanto como auxiliares nos processos de floculação e/ou filtração quanto como coagulantes principais (Bernardo *et al.*, 1998).

Os coagulantes orgânicos correspondem a polímeros, isto é, estruturas formadas por cadeias de pequenas unidades repetitivas chamadas monômeros. Nos polímeros sintéticos, essas cadeias podem ser compostas por um único tipo de monômero ou por dois a três tipos distintos de subunidades. A quantidade total de unidades presentes na cadeia pode variar, resultando em compostos com diferentes pesos moleculares e, quando essas subunidades possuem carga elétrica, também com distintas densidades de carga. Além disso, as cadeias poliméricas podem apresentar configuração linear ou apresentar diferentes graus de ramificação (Vanacôr, 2005).

Quando a unidade monomérica de um polímero apresenta grupos capazes de se ionizar, como carboxila ou amina, ele é denominado polieletrólito. Esses compostos podem ter origem em proteínas ou polissacarídeos, sendo produzidos de forma sintética. Sua massa molecular costuma ser bastante elevada, variando aproximadamente entre 5.000 e 10.000.000 g. Os polieletrólitos de maior massa molecular são mais indicados para promover a floculação, pois suas longas cadeias possibilitam a formação de ligações entre pequenas partículas dispersas na água, favorecendo sua união e formando aglomerados maiores (Filho, 1985).

A classificação do polieletrólito depende do tipo de grupo ionizável presente: se for catiônico, apresenta carga positiva; se for aniônico, carga negativa; e, no caso dos anfotéricos, há simultaneamente grupos positivos e negativos, como ocorre em certas proteínas. Os polímeros catiônicos, ao se dissolverem em água, ionizam-se e passam a carregar carga positiva associada à sua cadeia principal, enquanto nos aniônicos essa carga é negativa. Já aqueles que não possuem grupos ionizáveis recebem o nome de polímeros não iônicos (Filho, 1985).

O N,N-Dimetil-N-2-propenil-2-propen-1-homopolímero de cloreto de amônio, conhecido como cloreto de polidialildimetilamônio (PolyDADMAC) é um polieletrólito catiônico muito utilizado em estações de tratamento de água, pois pode ser utilizado como coagulante ou auxiliar de coagulação, visando melhorar a remoção de turbidez durante a sedimentação e filtração (Pinto *et al.*, 2022).

O Poly-DADMAC tem carga positiva constante abaixo do pH 10 em consequência da acidez dos átomos de nitrogênio quaternário na molécula (Vanacôr, 2005).

O cloreto de dialildimetilamônio (DADMAC) é um sal de amônio quaternário de elevada pureza, caracterizado por apresentar alta densidade de carga e natureza catiônica. Sua estrutura molecular contém uma dupla ligação alquenila, o que possibilita a formação de homopolímeros lineares, bem como diferentes copolímeros obtidos por diversas reações de polimerização. Esse composto pode atuar como monômero catiônico, sendo empregado tanto na síntese de monopolímeros quanto na copolimerização com outros monômeros (Tiancheng Chemical, 2025). Na Figura 4 está apresentada a estrutura molecular do PolyDADMAC.

Figura 4 – Estrutura molecular do cloreto de amônio



FONTE: (Pinto *et al.*, 2022)

3.2.2.4. Flocculantes

Os flocculantes são substâncias utilizadas para facilitar a agregação de partículas dispersas em suspensão, promovendo a formação de flocos maiores e mais densos que podem ser facilmente separados do meio líquido. Em sua maioria, esses agentes são polímeros sintéticos solúveis em água, com estrutura macromolecular composta por unidades repetitivas chamadas monômeros. Tais polímeros podem ser eletricamente neutros ou conter grupos carregados, sendo classificados, neste último caso, como polieletrólitos — que podem apresentar caráter aniônico ou catiônico, conforme o tipo de carga predominante (Cetem, 2010).

A presença de cargas elétricas em sua estrutura molecular influencia diretamente a forma como o polímero se comporta na solução, podendo induzir o alongamento das cadeias moleculares em função da repulsão eletrostática interna. Essa conformação estendida favorece a eficiência do flocculante, aumentando sua capacidade de interação com partículas suspensas. Polímeros aniônicos de alto peso molecular são os mais indicados para processos

de espessamento, enquanto os catiônicos, com cadeias menores, são preferidos em etapas de filtração. Já polímeros com menor peso molecular tendem a atuar como dispersantes (Cetem, 2010).

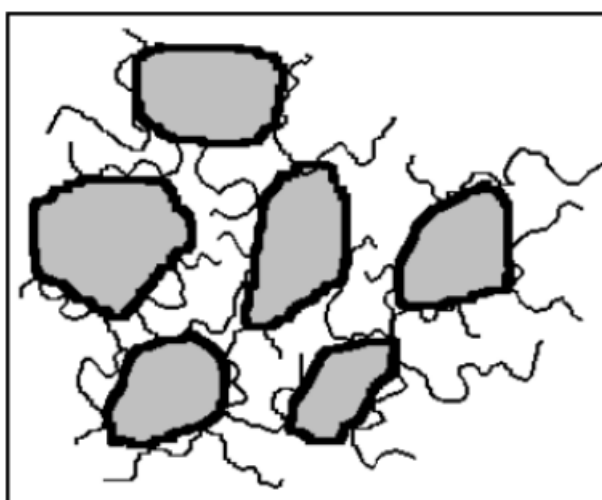
Vale destacar que a solubilidade desses compostos diminui à medida que sua massa molecular aumenta, e que agitação excessiva durante a preparação pode causar danos à estrutura dos polímeros. Por esse motivo, o desenvolvimento tecnológico tem buscado aprimorar a formulação de floculantes que combinem alto desempenho com boa solubilidade em água. Além disso, esses polímeros são capazes de se adsorver a superfícies minerais por meio de múltiplos pontos de contato, tornando a ligação estável e resistente à reversão (Cetem, 2010).

Para que ocorra a floculação, os principais mecanismos são:

(a) Formação de Pontes

O mecanismo de formação de flocos por pontes (Figura 5) ocorre, principalmente, em sistemas nos quais se utilizam polímeros sem carga elétrica ou com carga semelhante à da superfície das partículas minerais. Nessa condição, as cadeias poliméricas adsorvem-se em múltiplas partículas coloidais ao mesmo tempo, promovendo um entrelaçamento entre elas. Esse processo contribui para o aumento da densidade dos agregados formados, o que favorece sua separação por sedimentação (Luz *et al.*, 2010).

Figura 5 – Mecanismo simplificado de floculação dado por formação de pontes

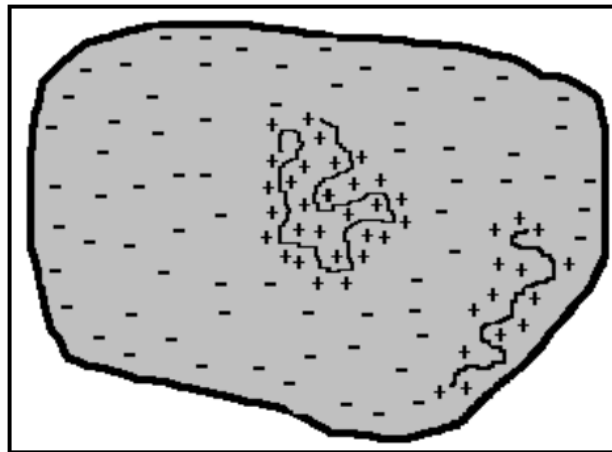


FONTE: (Luz *et al.*, 2010)

(b) Reversão Localizada de Carga

No mecanismo de reversão localizada de carga (Figura 6), um polímero com elevada densidade de carga interage com a superfície de partículas que apresentam excesso de carga negativa. Essa interação modifica a carga superficial na região coberta pelo polímero, provocando uma inversão local da polaridade. A partir disso, torna-se possível a aproximação e agregação entre partículas com cargas opostas, resultando na formação dos flocos (Leite, 2019).

Figura 6 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa, resultando na reversão localizada de carga



FONTE: (Cetem, 2010)

(c) Neutralização de Cargas

A floculação por neutralização de cargas ocorre quando se adiciona um polímero com baixa densidade de carga, capaz de compensar ou anular a carga superficial das partículas minerais. Essa neutralização reduz as forças de repulsão eletrostática entre as partículas, promovendo maior proximidade e consequente aglomeração (Luz *et al.*, 2010).

Os principais polímeros (floculantes) mais utilizados na indústria mineral, encontra-se na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Flocculantes mais utilizados para aplicação da indústria mineral

Tipo	Polímero	Fórmula/Estrutura Base
Neutro	Poliacrilamida (PAM)	$\text{CH}_2\text{--CH}(\text{CONH}_2)$
	Poli(óxido)etileno (POE)	$(\text{--CH}_2\text{CH}_2\text{O--})_n$
Aniônico	Poliacrilamida Hidrolisada (PAMH)	Copolímero com grupos --COOH
Catiônico	Copolímeros de acrilamida com monômeros catiônicos	--NH_3^+ (grupos amino/quaternários)

FONTE: Autora

3.3 Flotação

De modo geral, os minérios são constituídos por dois tipos de componentes: aqueles com valor econômico, chamados de minerais úteis, e aqueles sem interesse comercial, conhecidos como ganga. No caso do minério de ferro, os principais constituintes economicamente aproveitáveis são a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4) e a goethita ($\text{FeO}\cdot\text{OH}$). Já o quartzo (SiO_2) é identificado como o mineral de ganga mais recorrente nesse tipo de minério (Mapa, 2006).

Os processos de concentração mineral, também conhecidos como separação seletiva, têm como fundamento as diferenças nas propriedades físicas e químicas entre os minerais de interesse econômico e os minerais de ganga. Para que essa separação seja eficaz, é necessário que os minerais estejam previamente liberados uns dos outros. Dentre as características mais exploradas nesses processos, destacam-se a coloração, a densidade relativa, o formato das partículas, a granulometria, a suscetibilidade magnética e as propriedades superficiais (Mapa, 2006).

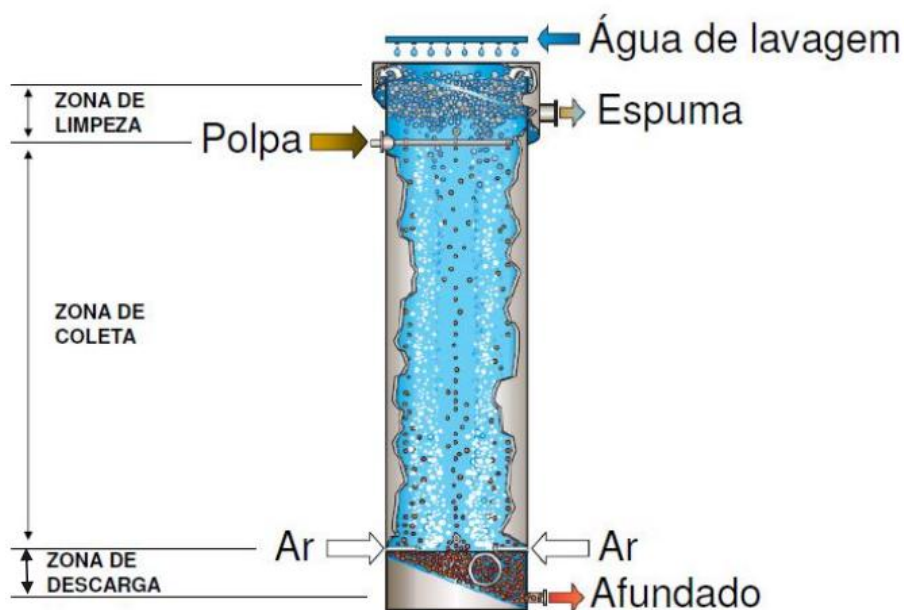
A flotação consiste em um método de concentração de partículas sólidas baseado nas distintas propriedades superficiais dos minerais envolvidos. Esse processo é aplicado a sistemas heterogêneos, compostos por partículas dispersas em meio aquoso, nos quais se injeta uma fase gasosa para promover a separação seletiva dos componentes minerais (Peres, 1980).

No início da flotação, todas as partículas presentes na polpa tendem a seguir a mesma trajetória. Contudo, em determinado momento, aquelas que se deseja flotar desviam-se desse percurso e passam a deslocar-se para cima. Essa mudança está ligada às propriedades superficiais dos minerais, que podem ser inerentes ou alteradas por meio da adição de reagentes específicos. Essa alteração favorece a adesão de certas partículas a bolhas de ar,

diminuindo a densidade do conjunto partícula-bolha em relação à do fluido. Como consequência, essas partículas tomam um rumo ascendente até a superfície, acumulando-se na espuma e separando-se das demais, que mantêm sua trajetória original (Chaves *et al.*, 2010).

Na flotação reversa aplicada ao beneficiamento de minério de ferro, ocorre o oposto do que se observa na flotação direta. Nesse caso, as partículas que são arrastadas pela espuma correspondem aos minerais de ganga, com destaque para o quartzo. Já os minerais portadores de ferro, como óxidos e hidróxidos, permanecem no fundo da célula, sendo direcionados para o concentrado. Essa permanência na parte inferior também está associada à maior densidade desses minerais, o que favorece sua sedimentação, conforme Figura 7 (Sales, 2012).

Figura 7 – Desenho esquemático de uma coluna de flotação



FONTE: (Viana, 2012)

Para que as partículas apresentem comportamento diferenciado e a flotação seja viável, geralmente é indispensável a adição controlada de reagentes específicos. Esses compostos incluem coletores, depressores, espumantes, ativadores, reguladores de pH, dispersantes, entre outros. A obtenção de concentrados de minério de ferro de elevada qualidade está diretamente relacionada ao ajuste preciso das dosagens empregadas. De forma geral, utiliza-se eteramina como coletor e amido, proveniente de milho ou mandioca, como depressor. O pH do sistema é mantido, na maioria das aplicações, entre 10 e 10,5, sendo ajustado por meio da adição de soluções alcalinas, como hidróxido de sódio (NaOH), ou pela introdução de

compostos que acidificam o meio, como o dióxido de carbono líquido, empregado em escala industrial. (Sales, 2012).

Na flotação do minério de ferro, o método mais comum é o processo catiônico reverso, no qual a amina atua simultaneamente como coletor e agente espumante. O amido gelatinizado é utilizado como depressor, enquanto a soda cáustica é empregada para ajustar o pH (Esteves, 2013). A seguir, apresentam-se os reagentes mais utilizados:

3.3.1. Amina

As aminas são compostos ionizáveis que não contêm enxofre e destacam-se como reagentes coletores na flotação de minerais não sulfetados, principalmente óxidos e silicatos. Esses compostos possuem natureza anfipática, ou seja, apresentam uma estrutura molecular com uma parte polar (hidrofílica), que possui um dipolo permanente, e outra parte apolar (hidrofóbica), sem dipolo permanente (Sales, 2012).

No grupo dos coletores ionizáveis não-tio, as aminas são as únicas que apresentam caráter catiônico quando ionizadas. A amônia (NH_3) é a matéria-prima fundamental para a obtenção dessas substâncias (Sales, 2012).

3.3.2. Amido de milho

O amido de milho, assim como o amido de mandioca, são os depressores mais empregados na flotação reversa do minério de ferro. Durante a flotação do quartzo, as aminas tendem a ser atraídas por interações eletrostáticas, inclusive nas superfícies dos minerais de óxidos de ferro, devido ao seu modo de adsorção. Por isso, o depressor, representado pelo amido, deve ser adicionado previamente à amina, o que impede que o coletor transforme em hidrofóbicas as superfícies dos minerais que não se deseja flotar. Dessa forma, a superfície dos óxidos de ferro permanece hidrofílica, tornando o processo mais seletivo (Sales, 2012).

3.3.3. Reguladores de pH

O pH representa uma das variáveis mais importantes no processo de flotação. Para alcançar os valores ideais, que variam conforme o tipo de minério, é necessária a adição controlada de ácidos ou bases. No caso da flotação de minério de ferro, o intervalo recomendado para o pH está entre 10,0 e 10,5. Nessa faixa, a amina apresenta cerca de 50% de dissociação, desempenhando simultaneamente as funções de coletor e agente espumante (Sales, 2012).

A soda cáustica (NaOH) é o principal agente regulador de pH usado em escala industrial, atuando para elevar o pH até os níveis desejados. Em algumas plantas, a solução de NaOH empregada possui concentração aproximada de 4% em massa. Quando a polpa ultrapassa o nível básico adequado, podem ser aplicadas soluções ácidas para corrigir o pH. Em laboratório, ácidos fortes como o ácido clorídrico (HCl) e o ácido sulfúrico (H₂SO₄) são comumente utilizados. Já na indústria, o dióxido de carbono líquido (CO₂) é frequentemente empregado, pois ao se dissolver em água, gera ácido carbônico (H₂CO₃), um ácido fraco que age de forma reversível e, em quantidades apropriadas, reduz o pH do sistema em operação (Sales, 2012).

3.4 Água de recirculação na flotação

No beneficiamento de minérios, destacam-se algumas etapas fundamentais: a cominuição, responsável pela redução do tamanho das partículas; a classificação, que organiza o material em intervalos granulométricos específicos; a concentração, que promove a separação do mineral de interesse econômico dos demais componentes; e a separação sólido-líquido, voltada à recuperação da água empregada nas etapas anteriores e ao ajuste do teor de umidade tanto do concentrado quanto dos rejeitos. Além dessas, incluem-se ainda a disposição dos rejeitos e outras operações de apoio (Leite, 2011).

Nos processos a úmido, como moagem, classificação, concentrações gravítica e magnética, flotação e lixiviação, a utilização de água é indispensável (Leite, 2011). Com o objetivo de minimizar os impactos ambientais decorrentes da atividade mineradora, foi instituída uma política nacional que estabelece a reutilização da água nos processos industriais. Essa diretriz incentiva a adoção e o aprimoramento de tecnologias voltadas ao tratamento e à recuperação de efluentes, de modo a garantir o atendimento aos padrões de qualidade definidos pela legislação ambiental vigente — como as Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 — além de normas estaduais, municipais e, quando aplicável, aos requisitos específicos do processo ao qual a água será reutilizada (Leite, 2011).

No contexto do processamento mineral, considera-se como água de reciclagem aquela que retorna ao processo, com ou sem tratamento prévio, desde que apresente condições físicas e químicas compatíveis com as etapas operacionais. Em fluxogramas modernos de beneficiamento, essa reciclagem envolve o reaproveitamento da água proveniente de espessadores, sistemas de recuperação e bacias de rejeitos, entre outras fontes. Em algumas operações mineradoras, além da presença de bacias de rejeitos projetadas adequadamente, a

proximidade em relação à usina de concentração favorece o retorno da água ao processo após o tempo necessário de decantação (Andrade *et al.*, 2010).

No beneficiamento mineral, a etapa de concentração é a que apresenta maior demanda por água, sobretudo devido aos processos de moagem e flotação, que são fortemente dependentes desse recurso. Entretanto, a qualidade da água necessária varia de acordo com cada operação, em função do tipo de interação estabelecida entre a água e o minério. Na moagem, geralmente, não ocorrem interações químicas significativas, sendo a água utilizada principalmente para favorecer a eficiência do processo. Já na flotação, ela atua como o meio onde se dá a separação das partículas, e sua qualidade influencia diretamente o desempenho da operação. Por esse motivo, a flotação representa um ponto crítico para o reaproveitamento da água no beneficiamento mineral (Bessa, 2017).

A composição química da água constitui um parâmetro de controle essencial na flotação, uma vez que o líquido empregado nessa etapa pode apresentar elevada concentração de íons devido aos processos de dissolução presentes na polpa. Essa alteração na composição iônica pode ocorrer tanto na água nova quanto na água reaproveitada, proveniente de espessadores ou de barragens de rejeitos (Ana, 2006).

Íons liberados na polpa em decorrência da dissolução de certos minerais, como Fe^{3+} , Ca^{2+} e Al^{3+} , podem provocar efeitos depressores indesejáveis no processo de flotação. Para evitar esse problema, é necessário remover esses íons antes da atuação do coletor, o que é feito por meio da adição de reagentes sequestradores, responsáveis por precipitar as espécies iônicas presentes na polpa (Luz *et al.*, 2010).

A recirculação da água contendo reagentes provenientes da flotação tende a aumentar a concentração desses compostos, o que pode afetar diretamente a recuperação do minério nas etapas de concentração (Ana, 2006). Por isso, é recomendada a realização de um tratamento adicional antes do reuso, visando reduzir a concentração iônica das espécies minerais presentes na polpa.

A água de reciclagem pode conter compostos orgânicos, inorgânicos e até resíduos sólidos que comprometem a eficiência da flotação. Esses contaminantes podem gerar impactos significativos no processo, como a formação de complexos entre metais e íons de coletores dissolvidos no meio aquoso, reduzindo a ação destes últimos (Luz *et al.*, 2010).

Dessa forma, torna-se fundamental a realização de análises laboratoriais para determinar as propriedades químicas e físicas da água utilizada na flotação. Esses ensaios devem contemplar tanto a água de alimentação do circuito quanto aquela destinada ao descarte ao final do processo de flotação. Tal monitoramento contribui para prevenir

problemas operacionais e assegurar a manutenção da eficiência metalúrgica na recuperação do minério (Luz *et al.*, 2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos empregados na realização deste trabalho, com o objetivo de atender aos objetivos propostos.

4.1 Materiais

Para a análise comparativa, foram utilizados dois tipos diferentes de coagulantes nos ensaios de sedimentação em proveta. O primeiro coagulante foi o óxido de cálcio, comercialmente denominado cal virgem calcítica (Amostra A). O segundo foi o N,N-Dimetil-N-2-propenil-2-propen-1-homopolímero de cloreto de amônio (Amostra B). Ambos os reagentes foram fornecidos por empresas de venda de coagulantes.

4.2 Amostragem

Para a realização dos testes de sedimentação em proveta, foi coletada uma alíquota de 30 litros de polpa de uma usina de beneficiamento do Quadrilátero Ferrífero.

Esse material, denominado lama, é composto por partículas ultrafinas, com tamanho inferior a 10 μm , provenientes do processo unitário de deslamagem, no qual ocorre a classificação do minério por meio de baterias de hidrociclones. Esse procedimento visa remover partículas ultrafinas que são prejudiciais à etapa de flotação. Após a separação, o material é direcionado ao espessador de lama.

Dessa forma, a polpa foi coletada do *overflow* do hidrociclone deslamador. O processo da usina estava estável, sem a adição de quaisquer reagentes, garantindo que suas características não fossem alteradas antes dos ensaios laboratoriais.

4.3 Ensaios de Sedimentação

A partir da amostra coletada, foram realizados testes de sedimentação em proveta para avaliar o comportamento da lama no processo de separação sólido-líquido. Antes dos ensaios, a amostra foi submetida a um processo de homogeneização conforme apresentado na Figura 9, com o objetivo de garantir a dispersão uniforme das partículas sólidas e assegurar a representatividade do material analisado.

Na sequência, uma fração da amostra foi separada para análise laboratorial, passando pelos procedimentos de pesagem, filtração e secagem.

Os ensaios de sedimentação foram realizados em seis provetas cilíndricas de 1000mL conforme apresentado na Figura 8, as quais possuíam marcações graduadas ao longo de sua altura para facilitar a leitura dos volumes sedimentados. As provetas foram cuidadosamente posicionadas sobre uma superfície plana e estável, livre de vibrações, garantindo condições controladas para a realização dos testes.

O planejamento experimental, conforme apresentado na Tabela 3, estabeleceu uma dosagem fixa de 25 g/t do floculante poliacrilamida aniônica (valor médio praticado industrialmente que varia entre 20 e 30 g/t). A cal virgem foi adicionada até a obtenção do pH igual a 10,6, sendo necessária uma dosagem aproximada de 3.717 g/t para atingir esse valor. No caso do cloreto de amônio, utilizou-se o pH natural da polpa de 8,52 e uma dosagem de 1250 g/t, valor estabelecido com consulta ao fabricante e ensaios preliminares.

Foram realizadas triplicatas tanto com o cloreto de amônio quanto com a cal virgem, de modo a recuperar a quantidade de água clarificada de 1800mL necessária para os ensaios de flotação.

Antes e após a adição dos reagentes (coagulante e floculante), a polpa foi homogeneizada por meio da movimentação ascendente e descendente de um plunger, de modo a garantir a adequada dispersão dos insumos no meio. O início do ensaio foi marcado a partir do momento em que a interface da polpa atingiu a marca de 1000 mL na proveta.

O processo de sedimentação foi acompanhado com registros do volume correspondente à interface sólido-líquido nos seguintes intervalos de tempo: 0, 15, 30, 45, 60 e 90 segundos; 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20 e 30 minutos.

Tabela 3 – Planejamento dos testes de sedimentação em proveta

Teste	Amostra	Dosagem de floculante (g/t)	Dosagem de coagulante (g/t)	pH
1	A	25	3717,47	10,6
2				
3				
4	B		1250	8,52
5				
6				

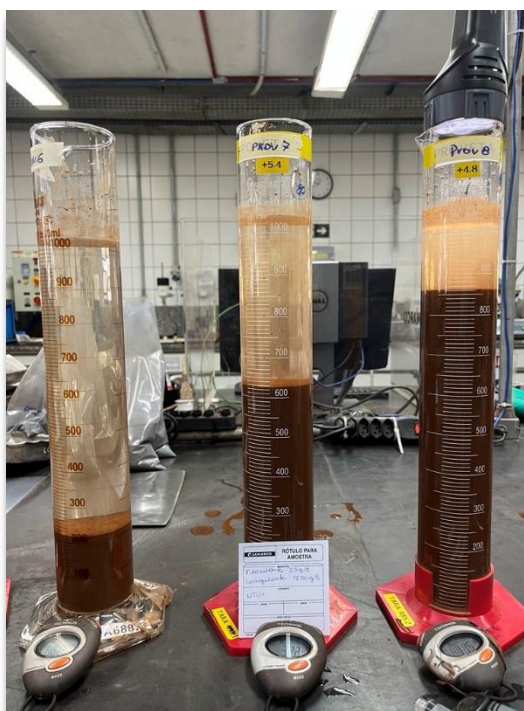
FONTE: Autora

Figura 8 – Provetas no início dos testes de sedimentação



FONTE: Autora

Figura 9 – Provetas ao longo dos testes de sedimentação



FONTE: Autora

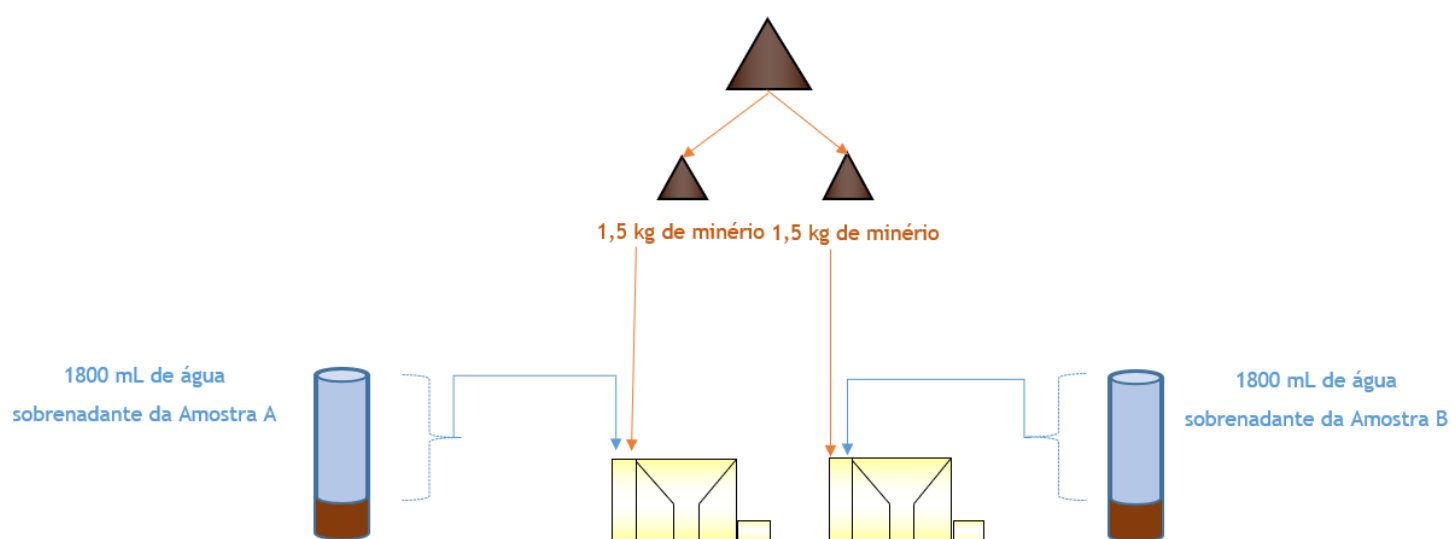
Após a conclusão dos testes, a turbidez da água clarificada foi mensurada utilizando o turbidímetro DIGIMED TURB-40B, permitindo a avaliação da eficiência da clarificação. Além disso, foi determinada a análise dos sólidos sedimentados e da velocidade de sedimentação.

4.4 Ensaios de Flotação – Recuperação Mássica e Metalúrgica

Após a finalização dos testes de sedimentação, a fração de água sobrenadante de cada proveta foi coletada separadamente, de acordo com o tipo de coagulante utilizado. Essa água foi posteriormente empregada como simulação da água de processo, permitindo avaliar, em escala laboratorial, seu possível impacto na cinética de flotação, bem como em parâmetros essenciais do processo, incluindo seletividade, recuperação metalúrgica e o teor de ferro tanto no concentrado quanto no rejeito.

Para a realização dos testes, utilizou-se 1,5 kg de minério proveniente de uma amostra padrão da alimentação da flotação. O minério foi transferido para uma cuba de flotação, à qual foi adicionada a água de processo obtida nos ensaios de sedimentação em provetas, realizados em triplicata, completando-se o volume até a marca de 1800 mL conforme apresentado na Figura 10. Em seguida, essa cuba foi acoplada a uma célula de flotação e ativada, promovendo a suspensão da polpa.

Figura 10 – Fluxograma representando os testes de flotação



FONTE: Autora

Durante o experimento, foram adicionadas as seguintes dosagens de reagentes: 325 g/t de amido de mandioca (depressor) a 1%, 63 g/t de amina (coletor) a 1% e correção do pH para 10,5 utilizando solução de NaOH a 3%. As quantidades aplicadas foram determinadas com base em procedimentos operacionais padrão, assegurando a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos.

A flotação foi conduzida em diferentes intervalos de tempo, sendo avaliados os tempos de 30, 60 e 90 segundos, além de 2, 4, 6 e 10 minutos. Após cada intervalo, o material flotado foi cuidadosamente coletado em bandejas separadas. Por fim, as amostras foram submetidas a processos de filtragem e secagem, sendo posteriormente analisadas para determinação da composição química. A Figura 11 apresenta as fotografias dos experimentos de flotação realizados em laboratório.

Figura 11 – Ensaios de flotação reversa de minério de ferro utilizando a água recuperada dos ensaios de sedimentação em proveta com os diferentes coagulantes



FONTE: Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos realizados neste trabalho, acompanhados das respectivas discussões.

5.1 Ensaios de Sedimentação em Proveta

Os resultados obtidos dos testes de sedimentação, comparando a utilização de dois diferentes tipos de coagulantes, está apresentado de forma gráfica, na Figura 12. A partir destes dados, é possível observar as diferenças de desempenho entre a Amostra A (cal virgem cálcica) e a Amostra B (cloreto de amônio).

De acordo com a análise química, a amostra A apresentou um teor de 74,65% de CaO. A partir da lama coletada e analisada em laboratório, foram obtidos os seguintes valores: 4,58% de sólidos e fração passante em 10 μm de 71,71%, caracterizando a lama como um material ultrafino.

Observa-se que a Amostra B apresentou uma maior velocidade de sedimentação (3,43 cm/min) em comparação à Amostra A (2,67 cm/min). Esse comportamento indica que o coagulante B foi mais eficiente no processo de aglomeração e decantação das partículas, favorecendo uma clarificação mais rápida da suspensão.

No que diz respeito ao percentual de sólidos no sedimento, a Amostra B também apresentou melhores resultados, atingindo 22,65%, enquanto a Amostra A apresentou apenas 15,99%. Isso demonstra que o coagulante B proporcionou a formação de flocos mais densos e compactos, resultando em maior concentração de sólidos no fundo do recipiente após a sedimentação.

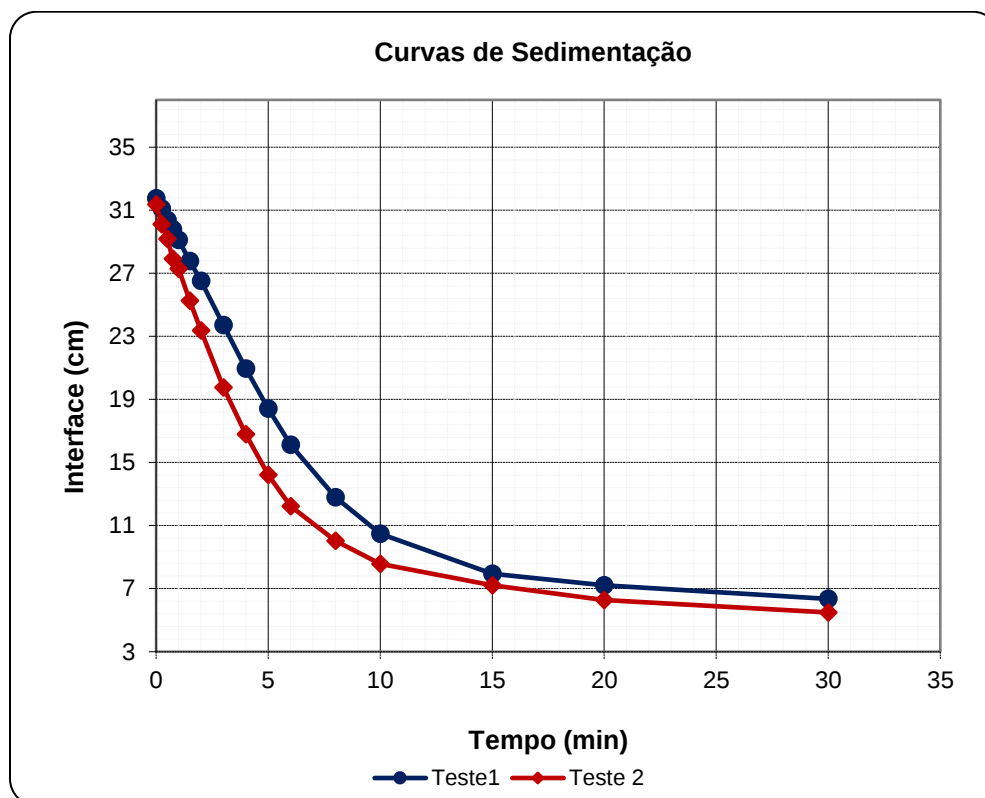
Além disso, a turbidez final do sobrenadante confirma a superioridade do desempenho da Amostra B, que alcançou 85,35 NTU, contra 184 NTU obtidos pela Amostra A. Esses valores evidenciam que o uso do coagulante B garantiu uma água mais clarificada, o que representa maior eficiência no processo de tratamento.

É importante destacar que a Amostra A demandou uma dosagem significativamente maior de reagente (3717,47 g/t) para atingir os resultados alcançados, enquanto a Amostra B necessitou apenas de 1250 g/t. Isso implica não apenas em maior consumo de insumos para a Amostra A, mas também em custos operacionais mais elevados e maior geração de resíduos.

Portanto, pode-se concluir que, em termos de desempenho técnico, a Amostra B apresentou os melhores resultados em todos os parâmetros avaliados (velocidade de

sedimentação, percentual de sólidos e turbidez). Já a Amostra A, mesmo cumprindo sua função, mostrou menor eficiência, demandando maior dosagem de insumo e resultando em sobrenadante com maior turbidez.

Figura 12 – Curva de Sedimentação para o coagulante A e coagulante B



FONTE: Autora

Durante a realização dos ensaios, observou-se que a dosagem de cal necessária para alcançar o pH de 10,6 varia conforme a composição química do reagente utilizado. A análise química da Amostra A revelou um teor de CaO de 74,65%, o que exigiu uma quantidade maior de cal para atingir o pH desejado. Esse comportamento está diretamente relacionado à eficiência do processo de coagulação, uma vez que o teor de óxido de cálcio influencia significativamente a reatividade do material.

A presença de um teor reduzido de CaO pode comprometer a formação de flocos estáveis e bem estruturados, resultando em uma coagulação menos eficiente. Por outro lado, um excesso desse componente pode levar à formação de flocos grandes demais ou causar um aumento acentuado do pH, o que também pode ser indesejável em determinados contextos. Assim, é fundamental encontrar um equilíbrio na concentração de CaO, de modo a garantir tanto a eficácia do tratamento quanto o uso racional dos insumos.

Esse resultado reforça a importância de se considerar a qualidade da cal utilizada, não apenas do ponto de vista técnico, mas também econômico e ambiental. A necessidade de uma dosagem maior, como no caso da Amostra A, pode implicar em maior consumo de insumos e, conseqüentemente, em custos mais elevados e maior geração de resíduos. Por isso, a utilização de reagentes com maior pureza, quando viável, pode representar uma estratégia eficaz para otimizar processos, reduzir gastos e promover práticas mais sustentáveis.

Na utilização da amostra B, verificou-se um aumento na velocidade de sedimentação e uma melhora significativa na qualidade do sobrenadante. Observou-se ainda que a dosagem do cloreto de amônio foi cerca de três vezes inferior à dosagem de cal, o que evidencia uma maior eficiência do produto e ressalta a importância dessa diferença na análise de custo entre ambos os reagentes.

5.2 Ensaios de Flotação – Recuperação Mássica e Metalúrgica

Os resultados obtidos nos testes de cinética de flotação, que comparam o uso da água clarificada a partir de dois diferentes tipos de coagulantes, estão apresentados nas Tabelas 4 e 5 e, graficamente, na Figura 13. A partir desses dados, é possível observar as diferenças de desempenho da água entre a Amostra A (cal virgem cálcica) e a Amostra B (cloreto de amônio), considerando o teor médio de ferro no rejeito, a recuperação metalúrgica e a recuperação mássica.

Tabela 4 – Resultados obtidos da cinética de flotação utilizando a água clarificada com a cal virgem

Teste: Cinética de Flotação utilizando a água clarificada com a Cal Virgem							
Produto	Tempo de flotação	Massa (g) flotado	% Fe	% SiO ₂	Teor SiO ₂	Teor Acum. % de Fe acumulado no rejeito	Massa de Fe (g)
					Concentrado	Fe rejeito	
Alimentação	0	1496,40	42,43	36,69	36,69	---	634,93
Rejeito 1	0,5	604,80	15,23	77,30	9,14	15,23	92,11
Rejeito 2	1	68,40	19,24	71,10	3,99	15,64	13,16
Rejeito 3	1,5	14,50	37,88	43,34	3,28	16,11	5,49
Rejeito 4	2	6,80	60,30	10,01	3,23	16,54	4,10
Rejeito 5	4	9,80	58,10	13,43	3,10	17,12	5,69
Rejeito 6	6	4,00	64,20	4,19	3,09	17,38	2,57
Rejeito 7	10	9,20	64,22	4,23	3,08	17,98	5,91
Concentrado		778,90	64,95	3,08	---		505,90

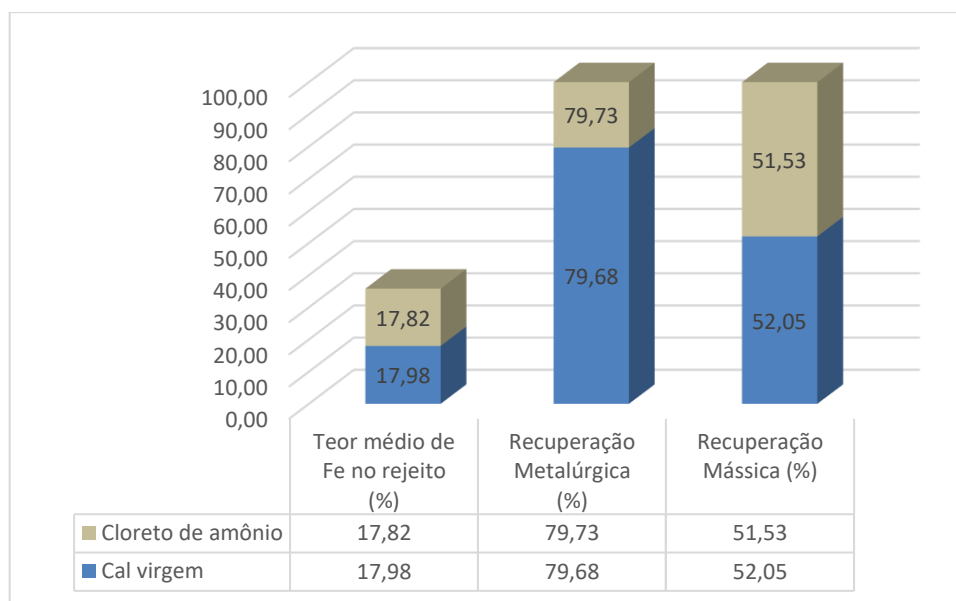
FONTE: Autora

Tabela 5 – Resultados obtidos da cinética de flotação utilizando a água clarificada com o cloreto de amônio

Teste: Cinética de Flotação utilizando a água clarificada com o cloreto de amônio							
Produto	Tempo de flotação	Massa (g) flotado	% Fe	% SiO ₂	Teor SiO ₂	Teor Acum. % de Fe acumulado no rejeito	Massa de Fe (g)
					Concentrado	Fe rejeito	
Alimentação	0	1494,80	42,43	36,69	36,69	---	634,21
Rejeito 1	0,5	622,20	14,68	78,15	7,13	14,68	91,34
Rejeito 2	1	54,20	20,73	68,92	3,04	15,16	11,24
Rejeito 3	1,5	11,20	39,62	40,80	2,51	15,56	4,44
Rejeito 4	2	4,30	56,40	15,80	2,44	15,82	2,43
Rejeito 5	4	9,00	65,54	2,31	2,44	16,46	5,90
Rejeito 6	6	7,90	63,43	5,42	2,41	16,98	5,01
Rejeito 7	10	12,70	64,55	3,84	2,39	17,82	8,20
Concentrado		773,30	65,39	2,39	---		505,66

FONTE: Autora

Figura 13 – Comparativo dos resultados dos ensaios de cinética de flotação, utilizando a água clarificada pela ação da cal virgem calcítica e do cloreto de amônio



FONTE: Autora

Conforme apresentado na figura 13, foi possível observar que ambos os reagentes apresentaram resultados próximos, tanto na recuperação metalúrgica quanto na recuperação mássica. Isso mostra que ambos os coagulantes utilizados não interferiram negativamente no processo de flotação.

A recuperação metalúrgica de ferro foi de 79,68% no ensaio com cal virgem e 79,73% no ensaio com o cloreto de amônio. Esses valores praticamente iguais indicam que o uso do coagulante não comprometeu o aproveitamento do ferro na etapa de flotação.

A recuperação mássica também se manteve semelhante, com 52,05% para a cal virgem e 51,73% para o cloreto de amônio, o que reforça que ambos os reagentes tiveram comportamento parecido na separação das partículas durante o processo.

O teor médio de ferro nos rejeitos foi de 17,98% com cal virgem e 17,82% com o cloreto de amônio, mantendo o teor médio de ferro para o rejeito, resultando em rejeitos com baixo teor metálico dentro do praticado para esta etapa de flotação.

De modo geral, os resultados indicam que o cloreto de amônio pode ser usado como alternativa à cal virgem, pois a água do sobrenadante do teste de sedimentação, ao ser utilizada como água de recirculação no teste de flotação, apresentou os mesmos resultados que a água resultante do teste de sedimentação utilizando a cal.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo, foi possível avaliar o comportamento e o desempenho de dois diferentes coagulantes utilizados na etapa de espessamento de lamas e na clarificação da água de recirculação empregada na flotação de minério de ferro itabirítico. Os ensaios laboratoriais demonstraram que ambos os reagentes a cal virgem calcítica e o cloreto de amônio foram eficazes no processo de separação sólido-líquido, atendendo aos objetivos propostos, porém com desempenhos distintos.

Nos testes de sedimentação em proveta, o cloreto de amônio apresentou desempenho superior em todos os parâmetros analisados, promovendo maior velocidade de sedimentação, maior concentração de sólidos no sedimento e menor turbidez no sobrenadante. Além disso, apresentou resultados satisfatórios mesmo em dosagens significativamente menores do que as empregadas pela cal, o que evidencia sua eficiência técnica no tratamento de lamas.

Em relação à etapa de flotação, verificou-se que o uso da água clarificada proveniente dos ensaios com ambos os coagulantes não afetou de forma negativa o processo. As recuperações metalúrgica e mássica apresentaram valores muito próximos, confirmando que utilizando o cloreto de amônio não compromete o desempenho da flotação. Dessa forma, o reagente se mostrou tecnicamente viável para uso em sistemas de beneficiamento de minério de ferro, apresentando resultados equivalentes aos da cal tradicionalmente utilizada.

Contudo, é importante destacar que este trabalho teve foco na análise técnica dos reagentes, não abrangendo o aspecto econômico. Assim, recomenda-se a realização de estudos complementares que considerem o custo dos insumos e os impactos ambientais associados ao uso de cada reagente.

De modo geral, os resultados obtidos reforçam a importância da busca por alternativas mais eficientes e sustentáveis para os processos de tratamento de efluentes e recirculação de água em usinas de beneficiamento mineral, contribuindo para a redução do consumo de reagentes e para o uso mais racional dos recursos hídricos na mineração.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: ANA; IBRAM, 2006.

ANDRADE, M. C. et al. Água no processamento mineral. In: FRANÇA, S. C. A.; ANDRADE, M. C.; LUZ, A. B. *Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 5. ed. Cap. 18.

ADAMSON, Arthur W. Physical Chemistry of Surfaces. 5. ed. New York: Wiley-Interscience, 1990

BRAGANÇA, A. C. C. R. Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BESSA, Ana Carolina Gonçalves. Aspectos do uso e reuso da água no beneficiamento mineral, com foco na etapa de flotação. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão, Catalão, 2017.

BRATBY, John. Coagulation and Flocculation: With an Emphasis on Water and Wastewater Treatment. Croydon: Upland Press, 1980.

CHAVES, A. P. *Teoria e prática do tratamento de minérios*. 2. ed. v. 2. São Paulo: Signus, 2004.

CHAVES, A. P.; FILHO, L. S. L.; BRAGA, P. F. A. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 465 p.

CHAVES, Arthur P. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Vol. 1: Flotação e Operações Auxiliares*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 567 p.

DI BERNARDO, A.; DI BERNARDO, L.; FROLINI, E. Influência do método de preparação da solução de polímeros naturais, amido natural e amido catiônico, na eficiência da floculação quando utilizados como auxiliares. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (8.:1998, João Pessoa). Anais. Rio de Janeiro: ABES, 1998. Tema I, n. 83, p. 77-91.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, Â. D. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.

ESTEVES, C. F. *Utilização, reúso e gerenciamento da água nas usinas de beneficiamento de minério de ferro*. 2013. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FILHO, D. F. S. *Tecnologia de tratamento de água*. 3. ed. São Paulo: Nobel, 1985. 251 p.

GUIMARÃES, J. E. P. *A cal: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002. 341 p.

LEITE, A. M. *Amidos modificados como floculantes de lama de rejeito de minério de ferro*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

LUZ, Adão B.; SAMPAIO, José A.; FRANÇA, Sueli C. *Tratamento de Minérios*. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. *Tratamento de minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867 p. Cap. 14.

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

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LEITE, Wanderson Pereira. Recuperação e recirculação de água no processamento mineral. 2011. Monografia (Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais – CEERMIN) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

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

OLIVEIRA, Maria Lúcia M. de; LUZ, José Aurélio Medeiros da; LACERDA, Carla Maria Mendes. *Espessamento e filtragem*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, 2004.

PERES, A. E. C.; COELHO, E. M.; ARAUJO, A. C. de. Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva. In: *Tratamento de minérios e hidrometalurgia: In Memoriam Prof. Paulo Abib Andery*. Recife: ITEP-CNPq, 1980.

PEARCE, M. J. Historical use and future development of chemicals for solid–liquid separation in the mineral processing industry. *Minerals Engineering*, v. 1, n. 2, p. 103-108, fev. 2003.

PINTO, Gabriela C.; MOREIRA, Renata P. L.; SOUZA, Gabriel da Silva; COSTA, Marcelo Moreira da. *Produção de PolyDADMAC a partir do DADMAC*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2022. Projeto de Pesquisa (PIBIC/UFV).

PIANTÁ, Cyro Antônio Vianna. Estudo do uso de coagulantes e polímeros na clarificação de água para processos industriais. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z. *Coagulation and Flocculation in Water Treatment*. Tel Aviv: Technion Institute of Technology, 1993.

SALES, C. G. de. *Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu.* 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA, A. L. *Efeito da adição de cal hidratada na etapa de aglomeração das pelotas de minério de ferro produzidas pela Samarco S.A.* 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Tiancheng Chemical Co., Ltd. *Poly-aluminium chloride*. Disponível em: <https://pt.tianchengchemical.com/poly-aluminium-chloride/54417135.html>. Acesso em: 18 ago. 2025.

VALADÃO, G. E. S. *Minério de ferro: processo de obtenção e sua utilização na siderurgia. 6.3 – Separação sólido-líquido.*

VIANA, P. R. M. Notas de Aula do Curso de Especialização em Recursos Minerais – DEMIN: EMN 555 – Flotação de Minérios de Ferro. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

VANACÔR, Romualdo Nunes. *Avaliação do coagulante orgânico Veta Organic utilizado em uma estação de tratamento de água para abastecimento público.* 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2005.