



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



POLYANA ANDRADE AMORIM

DESEMPENHO DA CAL COMO COAGULANTE EM PARTÍCULAS FINAS DE
QUARTZO

OURO PRETO

2021

POLYANA ANDRADE AMORIM

DESEMPENHO DA CAL COMO COAGULANTE EM PARTÍCULAS FINAS DE
QUARTZO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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.

Orientadora: Prof. Dra. Érica Linhares Reis

Coorientador: Warleson Cândido dos Santos Vieira

OURO PRETO

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A524d Amorim, Polyana Andrade.

Desempenho da cal como coagulante em partículas finas de quartzo.
[manuscrito] / Polyana Andrade Amorim. - 2021.
40 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.

Coorientador: Warleson Cândido dos Santos Vieira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Minério de ferro. 3. Água -
Purificação - Coagulação. 4. Águas residuais - Purificação - Floculação. 5.
Cal. I. Reis, Érica Linhares. II. Vieira, Warleson Cândido dos Santos. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.752

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e três dias do mês de agosto de 2021, às 09h:30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Polyana Andrade Amorim**, intitulado: **"DESEMPENHO DA CAL COMO COAGULANTE EM PARTÍCULAS FINAS DE QUARTZO"**, perante comissão avaliadora constituída pela orientadora do trabalho, Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis, de M. Sc. Aline da Mata Chiacchio Leite e de M. Sc. Flávio Luiz Martins. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, a presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, a presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 15 (quinze) minutos para perguntas e respostas à candidata sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a M. Sc. Aline da Mata Chiacchio Leite em segundo, o M. Sc. Flávio Luiz Martins, e em último, a Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi aprovada por unanimidade, com a nota **9,5** (nove e meio), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. A discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 23 de agosto de 2021.

ERICA LINHARES

Assinado de forma digital por ERICA
LINHARES REIS:04393162609
Dados: 2021.08.23 11:32:11 -03'00'

REIS:04393162609

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

Co-orientador: Eng.^o de Minas: Warleson Cândido dos Santos Vieira

Membro: M. Sc. Aline da Mata Chiacchio Leite

Membro: M. Sc. Flávio Luiz Martins

Discente: Polyana Andrade Amorim

Aos meus pais por me apoiarem sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser meu suporte nessa caminhada. A Ele, toda honra e toda glória. À minha mãezinha, Nossa Senhora Aparecida, por sempre interceder por mim.

Aos meus pais, motivo maior de minha dedicação aos estudos, agradeço pelo incentivo, pelo amor nos momentos mais difíceis, por acreditar em mim, por me ensinarem a ter fé e nunca desistir.

A minha irmã Paola, pelo carinho, amizade e paciência. Você é o exemplo de que a mulher pode ser forte sem deixar a doçura de lado.

Ao Elkson, meu amor e meu amigo, pelo apoio incondicional, pela paciência e por não me deixar desistir dos meus sonhos.

A minha tia Vânia e a Gabi, por sempre estarem presente e me darem forças para prosseguir.

Ao meu trio preferido e irmãs de coração, Amanda Caroline e Amanda Valentim, por dar sentido a palavra amizade.

As minhas *friends* da UFOP, Fabiolla Viana e Miriam Gomes, que levarei para sempre comigo aonde quer que eu vá.

A Angélica, pela amizade e companheirismo.

A minha avó Lia e minha tia Cleusinha, pelo apoio, carinho e zelo.

A minha avó Dila (in memoriam), que a senhora sempre vele por mim ai de cima e que tenha muito orgulho da mulher que me tornei.

À professora Érica, minha orientadora, pelo suporte, sugestões e paciência durante essa fase acadêmica.

Ao Warleson Vieira, meu coorientador, por toda ajuda na realização dos testes. Sem você não teria sido possível.

Aos membros da banca, Aline da Mata Chiacchio Leite e Flávio Luiz Martins, por aceitarem o convite para a participação desta banca e pelas sugestões que contribuíram com a realização deste trabalho.

Ao DEMIN e a todos os professores, pelos ensinamentos e por me auxiliarem nessa formação como engenheira de minas.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

O SENHOR é a minha luz e a minha salvação; a quem temerei? O SENHOR é a força da
minha vida; de quem me recearei?”
Salmos 27:1

RESUMO

O rejeito de minério de ferro proveniente do beneficiamento a úmido é originado, principalmente, nos processos de deslamagem e concentração. Nessa situação, para maior eficiência na etapa de separação sólido-líquido, a coagulação e a floculação são essenciais na sedimentação de partículas finas presentes nesses rejeitos; porém, o flocculante mais utilizado pela indústria mineral, a poliacrilamida, não é eficiente para as partículas finas de quartzo sem a ação preliminar da cal. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho da cal como coagulante com a utilização da poliacrilamida como flocculante na sedimentação de partículas finas de quartzo nos valores de pH 8,9 e 10. Os reagentes foram utilizados em dose única, para a cal, foi assumido a dosagem de 30 mg/L e para a poliacrilamida a dosagem de 1 mg/L. Nos testes de agregação foi obtido melhor resultado para quartzo sedimentado (95,5%) com adição de cal e poliacrilamida em pH 10. A utilização apenas da poliacrilamida como agente de agregação apresentou baixo desempenho de sedimentação, não ultrapassando 45%, valor abaixo ao encontrado para os testes em branco. O melhor desempenho quanto a porcentagem de material sedimentado apenas com a utilização da cal ocorreu em pH 10 (77,9%).

Palavras-chave: sedimentação, coagulação, floculação, rejeito de minério de ferro, cal.

ABSTRACT

Iron ore tailings from wet processing mainly originate in the desliming and concentration processes. In this situation, for greater efficiency in the solid-liquid separation step, coagulation and flocculation are essential in the sedimentation of fine particles present in these tailings; however, the flocculant most used by the mineral industry, polyacrylamide, is not efficient for fine quartz particles without lime preliminary action. Thus, this work aimed to evaluate the performance of lime as a coagulant using polyacrylamide as a flocculant in the sedimentation of fine quartz particles at pH 8, 9 and 10. For lime, a dosage of 30 mg/L was assumed and for polyacrylamide the dosage of 1 mg/L. The aggregation tests showed that the best result (95,5%) regarding the percentage of sedimented quartz was obtained with lime and polyacrylamide at pH 10. Polyacrylamide showed low sedimentation performance, not exceeding 45%, a value below that was found for the blank tests. The best result for lime experiments was performed with pH 10 (77,9%).

Keywords: sedimentation, coagulation, flocculation, iron ore tailings, lime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da dupla camada elétrica.....	20
Figura 2: Diagrama de especiação do cálcio ($[Ca^{2+}] = 10^{-3}$ mol/L; T = 25 °C).....	21
Figura 3: Variação da dispersão do sistema em função do pH e da dosagem de CaO.....	22
Figura 4: Estrutura de monômeros de poliacrilamida.	26
Figura 5: Reação para obtenção da poliacrilamida.....	26
Figura 6: Potencial zeta do quartzo condicionado em água destilada.	27
Figura 7: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com adição de poliacrilamida e sem adição de reagentes.....	30
Figura 8: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com adição de cal e sem adição de reagentes.....	31
Figura 9: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com adição de cal e poliacrilamida e sem adição de reagentes.....	32
Figura 10: Análise da porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com e sem adição de todos os reagentes utilizados.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade de sedimentação em função do tamanho da partícula	18
Tabela 2: Doses de cal aplicadas, pH induzidos e eficiências de remoção atingidas	24

LISTA DE NOTAÇÕES

pH – Potencial hidrogeniônico

L – Litro (volume)

Mg – Miligramas (peso)

mg/L – Milígrama por litro (concentração)

g/t – Grama por tonelada (concentração)

PIE – Ponto isoelétrico

NTU – Unidade nefelométrica de turbidez

DQO – Demanda química de oxigênio

SST – Sólidos suspensos totais

CQO – Carência química de oxigênio

CBO - Carência bioquímica de oxigênio

COT – Carbono orgânico total

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivo geral.....	12
2.2. Objetivos específicos.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. Rejeito de minério de ferro.....	13
3.2. Separação sólido – líquido de rejeitos de minério de ferro.....	14
3.3. Sedimentação.....	17
3.4. Coagulação e floculação.....	18
3.4.1.Coagulação.....	18
3.4.1.1.Mecanismos de coagulação.....	20
3.4.1.2.A cal como coagulante.....	21
3.4.2 Floculação no beneficiamento mineral.....	25
3.5. Potencial zeta.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1.Testes de agregação.....	28
4.1.1. Estágio 1: testes com adição de poliacrilamida.....	28
4.1.2. Estágio 2: testes com adição de cal.....	29
4.1.3. Estágio 3: testes com adição do floculante após a coagulação das partículas.....	29
5.1. Testes de agregação.....	30
5.1.1. Amostras com adição do floculante.....	30
5.1.2. Amostras com adição do coagulante.....	31
5.1.3. Amostras com adição do floculante após a coagulação das partículas.....	32
5.1.4. Análise geral dos testes de agregação das partículas finas de quartzo.....	33
6. CONCLUSÃO.....	34

1. INTRODUÇÃO

Uma grande fração dos rejeitos de minério de ferro são originados da etapa de concentração por flotação. Antes da flotação de minérios de ferro é comum a etapa de deslamagem. Este processo gera como um dos produtos o *overflow* que tem como uma característica as partículas na fração granulométrica de lamas (mistura de colóides, que compreende a faixa de tamanho menor que 1 µm e de ultrafinos, que compreende a faixa de tamanhos entre 1 µm e 10 µm). Já no processo de flotação o produto denominado rejeito é composto, comumente, por partículas a partir de granulação fina (tamanho médio compreendido entre 10 µm e 100 µm) e, majoritariamente, o mineral quartzo (NOCITI, 2011; GOMES, PEREIRA e PERES, 2011). Os referidos produtos são considerados rejeitos do beneficiamento de minério e deve ser realizado o tratamento para a separação sólido-líquido e descarte adequado. Neste caso, é relevante avaliar a agregação prévia de partículas, para a melhoria da eficiência dessas operações.

Atualmente na mineração, os mecanismos de coagulação e floculação são utilizados na separação sólido- líquido. O óxido de cálcio (CaO) é considerado um dos compostos químicos mais efetivos no processamento mineral, pois ele é capaz de deprimir os minerais de ferro e coagular as partículas finas suspensas, tornando o processo de separação eficiente (FRANÇA E MASSARANI,2004).

A poliacrilamida é o floculante mais utilizado na indústria mineral, mas alternativas vêm sendo pesquisadas, visto que o seu monômero possui natureza tóxica para o consumo humano e o meio ambiente (GALEŠA *et al.*, 2008). Amidos de mandioca e de milho são exemplos de amidos naturais que vêm sendo estudados para substituir a poliacrilamida como floculante. (LEITE, 2019). Além disso, alguns estudos de agregação para minério de ferro foram desenvolvidos e verificou-se que a poliacrilamida não é um floculante eficaz para partículas de quartzo (LEITE, 2019).

Deste modo, este trabalho de pesquisa pretende avaliar o desempenho da cal como coagulante em partículas finas de quartzo utilizando a poliacrilamida como floculante.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho da cal como coagulante na sedimentação de partículas finas de quartzo utilizando poliacrilamida como floculante.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a influência da variação do pH na sedimentação de partículas finas de quartzo com e sem adição dos agentes de agregação;
- Avaliar a eficiência do floculante poliacrilamida após o uso da cal como coagulante na sedimentação das partículas finas de quartzo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro é oriundo do beneficiamento mineral e não possui valor econômico. Nesse processo são gerados dois tipos de rejeitos: o arenoso e o de lama (MAPA, 2006). O rejeito arenoso é composto por partículas ricas em dióxido de silício que são separadas das partículas ricas em ferro por processos de concentração.

Segundo Gomes (2009), o material fino do rejeito de minério de ferro (menor que 74 μm), apresenta alguma plasticidade e é menos permeável, o que dificulta o processo de sedimentação e o adensamento.

As características dos rejeitos variam em função do material lavrado e dos métodos empregados no beneficiamento do mesmo. Em plantas de beneficiamento a úmido que possuem processos como deslamagem, separação magnética e flotação é esperado, de forma geral, que os rejeitos possuam granulação fina e ultrafina (NOCITI, 2011). De acordo com Somasundaran (1980, *apud* Leite, 2019), partículas finas possuem granulação menor que 100 μm , as ultrafinas são menores que 10 μm , já as partículas menores que 1 μm são denominadas partículas coloidais.

Gomes, Pereira e Peres (2011) realizaram um trabalho de caracterização de rejeito de minério de ferro em uma barragem na mina do Córrego do Feijão. Os resultados obtidos identificaram que o rejeito apresentava teores médios de 48,08% de ferro, 20,58% de sílica e 3,16% de alumina. A análise granulométrica demonstrou que 58,81% da amostra se encontrava abaixo de 45 μm . Os principais minerais de ferro encontrados foram hematita, magnetita, magnetita e goethita e os de ganga foram quartzo, gibbsita e caulinita.

Estudos realizados por Silva *et al.* (2007) na mina de Alegria, localizada no município de Mariana, em um rejeito de minério de ferro, determinaram teores médios de 54,3% de ferro. Hematita e quartzo foram os minerais predominantes. O rejeito da mina é constituído por cerca de 80% de areia fina.

Neto (2016) caracterizou amostras de um espessador da unidade de Germano, localizada no município de Mariana. Foi observado que o rejeito arenoso apresentava uma granulação com d_{50} próximo de 40 μm , e sua composição química era de SiO_2 (80,08%), Fe (12,6%) e Al_2O_3 (0,8%), majoritariamente.

Nociti (2011) realizou testes em um rejeito de minério de ferro localizada na região de Guaratinguetá, e verificou uma composição química composta predominantemente por SiO_2 (75,42%) e Fe_2O_3 (23,72%). As fases minerais existentes eram quartzo, hematita e goethita. Os resultados também demonstraram que todo o material estava abaixo de 74 μm .

Conforme Dash *et al.* (2011), os rejeitos de minério de ferro contêm composição heterogênea, formados, majoritariamente, por óxidos de ferro, silicatos e silicatos de alumínio, e porcentagem de sólidos entre 5 a 10% (p/p). O rejeito de minério de ferro das minas de Rungta na Índia foi caracterizado em relação ao tamanho apresentando um d_{80} de 12 μm . A análise química identificou que as amostras continham principalmente Fe (40%), SiO_2 (18%), Al_2O_3 (14%) e os minerais presentes eram hematita, goethita, quartzo e caulinita.

3.2. Separação sólido – líquido de rejeitos de minério de ferro

Segundo Luz, Sampaio e França (2010) as operações de separação sólido-líquido são extremamente necessárias em diversos processos na indústria mineral que a requerem, em alguma etapa do beneficiamento. Existem dois objetivos básicos para a separação: a produção de um sólido desaguado e líquido clarificado.

No processo de separação sólido-líquido, o efeito de dispersão das partículas afeta diretamente a sedimentação de partículas menores que 10 μm , especialmente da fração argila (<2 μm), que é causada pelo movimento browniano característico dos colóides. Dessa forma, é necessário avaliar a necessidade de aglomeração prévia das partículas (coagulação/floculação) antes de submetê-las à operação de separação (LUZ, SAMPAIO E FRANÇA, 2010).

Nas operações de separação sólido-líquido, a granulação de partículas finas tem gerado grandes desafios para o beneficiamento. Quando em suspensão, as partículas finas demandam tempos longos para a sedimentação natural, dificultando a reutilização da água de processo, bem como o reaproveitamento do rejeito. A agregação dessas partículas pode ser aplicada na separação destas em meio líquido com a utilização de reagentes como coagulantes ou polímeros floculantes, os quais permitem a adesão de uma partícula diretamente à outra. Os processos de agregação são influenciados pelas características dos floculantes e coagulantes e pelos aspectos físico-químicos de um rejeito, como distribuição granulométrica, morfologia das partículas e mineralogia (GADÊLHA E FRANÇA, 2015).

O objetivo da separação sólido-líquido do rejeito de minério de ferro é separar as partículas em suspensão, devido à força da gravidade, de modo que as partículas mais densas sedimentam e o líquido clarificado ascenda. Um dos grandes desafios do beneficiamento do rejeito é a separação sólido-líquido de suspensões estáveis de partículas finas (RODRIGUES E OLIVEIRA, 2017). Segundo Dash *et al.* (2011) essa estabilidade pode ser alterada por controle de pH, força iônica e pela adição de coagulante e floculante polimérico, que facilita a agregação das partículas, e que conseqüentemente, se separam pela diferença de densidade.

Trampus, Moura e França (2019) caracterizaram um rejeito de minério de ferro proveniente de uma usina de beneficiamento localizada no quadrilátero ferrífero. O teste teve como objetivo avaliar a eficiência da separação sólido-líquido com o uso de floculante e coagulante para agregação de partículas abaixo de 50 μm . Para tal, foram utilizados como floculantes três poliacrilamidas aniônicas (Magnofloc 1011, Magnofloc 5250 e R-10), além do coagulante sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). O rejeito estudado apresentou composição mineralógica formada por quartzo, hematita, gibbsita e caulinita, com teores de SiO_2 (50,9%), Fe_2O_3 (34,2%) e Al_2O_3 (6,4%) preponderantemente. Os autores obtiveram um aumento de até 152% da velocidade de sedimentação e 98% da redução da turbidez do sobrenadante a partir do uso do floculante Magnofloc 1011 na agregação das partículas finas do rejeito de minério de ferro. A coagulação reduziu a turbidez em até 99,95% para valores abaixo de 100 NTU.

Dash *et al.* (2011) realizaram testes de sedimentação com rejeito de minério de ferro, de uma mina localizada na Índia, que apresentava 8% de sólidos. Nos estudos foram utilizados floculantes poliacrilamida aniônico e não-aniônico, variando-se as dosagens nas faixas de 0-100 g/t e pH entre 6,5 e 10. Os resultados demonstraram que a taxa de sedimentação aumenta à medida que o pH diminui e aumenta conforme se eleva a quantidade de dosagem do floculante. A maior taxa de sedimentação (14,45 m/h) foi alcançada em pH 6,5 com 80 g/t de poliacrilamida aniônica, que corresponde a adsorção máxima do polímero. Os autores concluíram que há maior adsorção da poliacrilamida não aniônica se comparada com a aniônica, devido à maior carga superficial negativa dos minerais em pH alcalino; todavia, a taxa de sedimentação durante a floculação com a poliacrilamida não aniônica é menor. O pH ideal encontrado foi de 6,5, com a poliacrilamida aniônica na dosagem de 80 g/t, onde 87% de partículas sólidas foram floculadas enquanto o restante permaneceu em estado disperso.

Leite (2019) realizou testes de agregação com rejeito de minério de ferro, com o intuito de verificar a eficiência de diversos reagentes na floculação de partículas. O rejeito estudado era

composto predominantemente por hematita e quartzo, apresentando 5% de sólidos e $d_{50} = 10$ μm . Foram utilizadas dosagens de 1 mg/L, 10 mg/L e 100 mg/L para o amido catiônico pré-gelatinizado, amido catiônico reticulado e amido ceroso, e de 1 mg/L para a poliacrilamida. O pH variou entre 6-9. Os resultados evidenciaram que dentre os compostos de amidos aplicados, o amido catiônico pré-gelatinizado obteve melhor resultado quanto a porcentagem de material sedimentado com dosagem de 10 mg/L e pH 7, tanto para hematita (98,97%) quanto para o quartzo (99%). A poliacrilamida, por sua vez, foi eficaz para a hematita (> 98%), mas não para o quartzo (< 50%).

Lopes (2017) efetuou testes de sedimentação com um rejeito de minério de ferro com o objetivo de atingir um espessado com 60% de sólidos. A amostra era proveniente de um espessador da mineradora Minerita Ltda, localizada em Itatiaiuçu-MG. A autora utilizou a poliacrilamida aniônica, com nome comercial SUPERFLOC 8566, variando as dosagens entre 15-30 g/t e pH entre 5-6,5. A caracterização do rejeito apontou que este era composto predominantemente por quartzo e hematita, teores de SiO_2 (72,97%), FeO_3 (17,94) e Al_2O_3 (7,99%) e $d_{80} = 65$ μm . Os estudos demonstraram que os valores ótimos para obter o mínimo de turbidez (61 NTU) e máximo de velocidade de sedimentação (1,78 m/h) foram os testes que apresentaram dosagem de 30 g/t, pH 5 e porcentagem de sólidos igual a 25%.

Ventura (2018) também realizou testes de sedimentação do rejeito de minério de ferro da mineradora Minerita Ltda, utilizando o floculante copolímero de acrilamida, denominado Flotisor FK 7130 e o coagulante sulfato de alumínio, denominado comercialmente por Flotisor OT 7429. Para os testes, foram utilizadas dosagens de 20 g/t e 40 g/t de floculante e dosagens de 100 mg/L e 300 mg/L de coagulante. Além da dosagem, também se alterou o pH, utilizando valores de pH 5 e pH 10 e porcentagem de sólidos de 25% e 40%. A caracterização mineralógica identificou um material composto essencialmente por hematita e quartzo e granulometria menor que 37 μm . Os resultados mostraram que o coagulante não apresentou ganho significativo na velocidade de sedimentação. O melhor resultado para maior velocidade de sedimentação (2,567 mm/s), menor turbidez e menor gasto com reagente foi encontrado na dosagem de floculante de 20 g/t, pH 5 e 25% de sólidos.

Filizzola (2016) realizou testes de sedimentação com amostras de hematita compacta, hematita especular e quartzo puros (< 37 μm) com 1000 g/t de amido de milho e 10 g/t poliacrilamida não iônicas (Magnafloc 351-BASF; Flonex 920-SNF Foerger; Superfloc N100 e Superfloc N300- Cytec), a fim de verificar a eficiência e seletividade dos diferentes floculantes na

dispersão das polpas em pH 10,5. Constatou-se que todos os reagentes poliacrilamida reduziram o grau de dispersão da polpa das amostras, conquanto de forma não seletiva. Por outro lado, quando amido foi adicionado à suspensão, houve uma diminuição do grau de dispersão do sistema para as hematitas. Já para o quartzo, após a adição de amido, o grau de dispersão permaneceu elevado, o que demonstrou o caráter seletivo do amido.

3.3. Sedimentação

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-líquido baseado na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão. Ela se baseia no transporte descendente de partículas sólidas, de forma que ocorra a remoção destas. Tais partículas estão sujeitas às forças de empuxo, de resistência e a de gravidade (FRANÇA E MASSARANI, 2004).

O espessamento é a técnica mais empregada nas plantas de beneficiamento de minério de ferro para adensamento de rejeito, devido ao seu menor custo. O espessador é capaz de receber polpas com baixa porcentagem de sólidos (de 5 a 10% de sólidos) e gerar um *underflow* entre 65% a 75% de sólidos e um *overflow* que possa ser utilizado como água de recirculação (CHAVES, 2010; DASH *et al.*, 2011; LEITE, 2019). Para facilitar a sedimentação do material, pode ser usado coagulantes e floculantes, que auxiliam no espessamento do rejeito de minério de ferro em virtude da dificuldade de sedimentar partículas finas em suspensão presente nesse rejeito (LEITE, 2019).

No espessamento, partículas maiores sedimentam com maior velocidade. Esse fato é comprovado pela Lei de Stokes, no qual, o diâmetro das partículas é diretamente proporcional a velocidade (BALTAR, 2010):

$$V = \frac{gd^2(\rho_1 - \rho_2)}{18\eta} \quad (1)$$

Onde:

- V = velocidade terminal da partícula;
- g = aceleração da gravidade;
- d = diâmetro da partícula;
- ρ_1 e ρ_2 = a densidade do líquido e da partícula, respectivamente;
- η = viscosidade do meio.

Partículas mais finas sedimentam com velocidade extremamente lenta, o que reduz a eficiência da sedimentação. Dessa forma, torna-se necessário a agregação dessas partículas como meio para aumentar a eficiência do método (BALTAR, 2010).

Zajic (1971, *apud* Baltar, 2010) comparou a velocidade de sedimentação de duas partículas com diferentes tamanhos, como mostrado na Tabela 1, que comprova a essencialidade do uso de coagulantes e floculantes no processo para obtenção de maior diâmetro, e conseqüentemente, de maior velocidade de sedimentação.

Tabela 1: Velocidade de sedimentação em função do tamanho da partícula

Tamanho da partícula (μm)	Velocidade de sedimentação
1	1mm/h
0,01	1mm/ ano

Fonte: adaptado de BALTAR (2010).

São diversos fatores que podem afetar a sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas, tais como: a natureza das partículas (tamanho, distribuição, forma, densidade específica etc.), porcentagem de sólidos na suspensão, pré-tratamento da suspensão (para auxiliar na sedimentação) e dimensionamento do tanque de suspensão (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

3.4. Coagulação e floculação

Segundo França e Casqueira (2007), os processos de aglomeração de partículas, que são descritos pelos mecanismos de coagulação e floculação, tem grande importância na melhoria da eficiência das operações de separação sólido-líquido. A coagulação e floculação se diferenciam pelo composto químico utilizado.

3.4.1. Coagulação

A coagulação tem por objetivo a remoção de material em suspensão ou em estado coloidal. Os colóides são partículas que apresentam tamanho entre 1 nm a 0,1 μm , e causam turbidez e cor. Por possuírem propriedades elétricas que criam uma força de repulsão, essas partículas não se sedimentam, não se aglomeram e não são retiradas por processos convencionais físicos do beneficiamento mineral (ECKENFELDER, 1989 ; WIMMER, 2007).

A coagulação é o processo de desestabilização das partículas coloidais e suspensas de maneira que as colisões entre as partículas causem o seu crescimento (METCALF & EDDY, 1991). O coagulante desestabiliza a suspensão coloidal reduzindo todas as forças atrativas, permitindo que o floco seja formado através da agregação das partículas (WIMMER, 2007).

A coagulação resulta de dois eventos, com duração de poucos segundos: o primeiro, fundamentalmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e depende da concentração do metal e pH final da mistura; o segundo, substancialmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água (WIMMER, 2007).

De acordo com Libânio (2005), no processo denominado hidrólise, os íons metálicos (positivamente carregados) em solução aquosa, formam fortes ligações com os átomos de oxigênio podendo coordenar até seis moléculas de água ao redor, liberando os átomos de hidrogênio (aumentando a concentração do íon H^+) e reduzindo o pH da suspensão; o produto formado pode resultar em um precipitado de hidróxido do metal. A eficiência da coagulação interfere diretamente nas outras etapas do processamento. À vista disso, o objetivo principal da coagulação baseia-se em elevar a velocidade de sedimentação do aglomerado de partículas a ser formado pela adição do coagulante.

Conforme Guedes *et al.* (2004) as partículas desestabilizadas pelo coagulante serão capazes de se agregarem em flocos, através de mecanismos de transporte, como: movimento Browniano, a força da gravidade ou a convecção forçada do fluido. A coagulação é afetada por propriedades da água tais como temperatura, pH, natureza do agente coagulante e sua dosagem, alcalinidade, carbono orgânico total (COT) e por parâmetros operacionais que afetam as condições hidrodinâmicas do meio.

Na indústria mineral, referindo-se os inorgânicos, os coagulantes sulfato de alumínio e sulfato férrico são os mais utilizados em processos com baixa concentração de sólidos devido à propriedade hidrolizante destes sais. O óxido de cálcio (CaO), bastante utilizado nas operações de separação envolvendo altas concentrações, é capaz, dentre outros, de coagular as partículas suspensas e promover o aumento de pH da polpa. Dessa forma, ele é considerado um dos compostos químicos mais efetivos no processamento mineral (FRANÇA E MASSARANI, 2004).

3.4.1.1. Mecanismos de coagulação

Segundo Di Bernardo (2000), atualmente considera-se a coagulação como o resultado de três mecanismos distintos:

- I. Compressão da dupla camada elétrica: Região de concentrações elevadas de íons negativos e positivos decorrente da aproximação dos íons de carga oposta à superfície das partículas colidais dispersas na água, resultante das forças de repulsão eletrostática e de atração de van der Waals. A compressão da dupla camada elétrica acarreta o acréscimo de eletrólitos ao sistema (WIMMER, 2007). Com o aumento da concentração iônica, a dupla camada tem seu volume reduzido e a energia de repulsão diminui dissolvendo a barreira energética, o que possibilita a aglomeração de partículas (LEITE, 2019). A representação da dupla camada elétrica é representada na Figura 1:

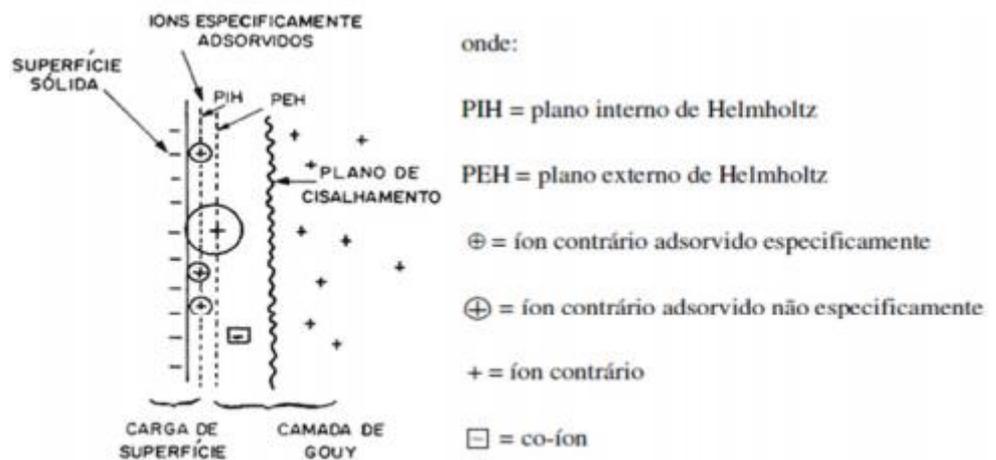


Figura 1: Representação esquemática da dupla camada elétrica

Fonte: PARKS (1975).

- II. Adsorção e neutralização: Espécies químicas de carga contrária à da superfície da partícula se adsorvem na mesma, resultando em interações como: ligação de hidrogênio, reações de coordenação, ligações covalente e reações de troca iônica (LEITE, 2019). Essa etapa ocorre antes da formação do floco e a agitação rápida é necessário para que seja efetivo.
- III. Varredura: Dependendo do pH da solução, da quantidade adicionada de coagulante e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a precipitação de sais hidrolisados (de alumínio e ferro, usualmente), provocando a sedimentação dos

coloides (LEITE, 2019). Normalmente, os flocos obtidos com esse mecanismo são maiores e sedimentam mais facilmente que os flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo anterior (DI BERNARDO, 2000).

3.4.1.2. A cal como coagulante

A cal hidratada é adicionada à polpa de minério de ferro com o objetivo de adequar as condições de dispersão do mesmo. A cal reage com a água formando o hidróxido de cálcio que se dissocia, e altera o pH. A presença dos íons Ca^{2+} e CaOH^+ altera o estado de dispersão do minério. Os reagentes, como a cal, possuem mecanismos próprios para reduzir a barreira energética entre as duas partículas, favorecendo a agregação das mesmas quando elas se aproximam (SOUZA, 2014). Na Figura 2 é mostrado o diagrama de especiação do cálcio, para uma concentração específica.

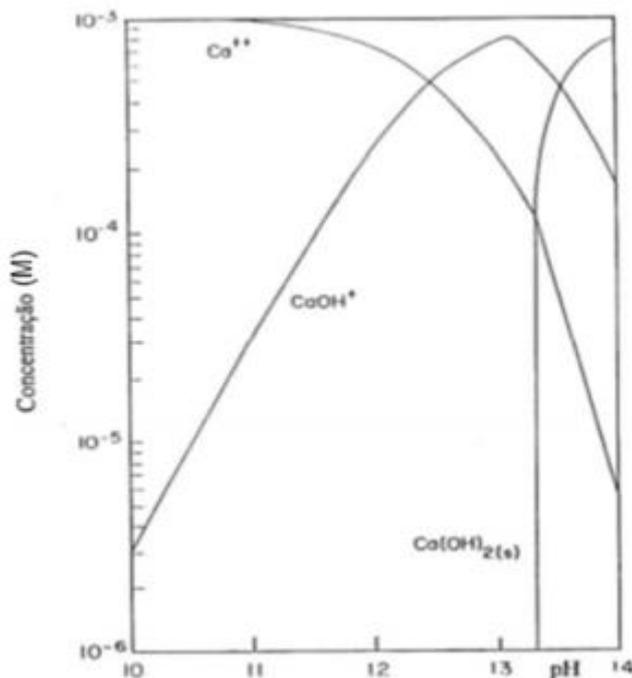


Figura 2: Diagrama de especiação do cálcio ($[\text{Ca}^{2+}] = 10^{-3} \text{ mol/L}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Fonte: FUERSTENAU e PALMER (1976) *apud* SOUZA (2014).

Silva, Martins e Reis (2017) realizaram testes de sedimentação para rejeito de minério de ferro composto predominantemente por quartzo e goethita, com partículas menores que $38 \mu\text{m}$. Ao empregar dosagem média igual a 30 mg/L de cal e pH máximo de 10,5; obtiveram nos referidos testes, velocidade de sedimentação equivalente a $0,54 \text{ cm/min}$, concentração mássica de 13,5% e turbidez correspondente a 12,2 NTU.

A cal é o reagente mais utilizado na precipitação química para os tratamentos de lixiviado de aterro, de esgoto e de água. Ela apresenta algumas vantagens no seu uso, que incluem: grande disponibilidade; não contribui para o aumento da salinidade, como os sais de alumínio e ferro utilizados na coagulação; simplicidade do método e baixo custo (THORNTON E BLANC, 1973; HO *et al.*, 1974; KEENAN *et al.*, 1983; SLATER *et al.*, 1983; MILLOT, 1986 *apud* MELLO *et al.*, 2012).

Conforme descrito por Souza (2014), há uma variação da dispersão do sistema em função da dosagem de cal e da alcalinidade, o que permite a neutralização ou diminuição da carga superficial negativa das partículas. A Figura 3 mostra os diferentes cenários que pode ocorrer a dispersão.

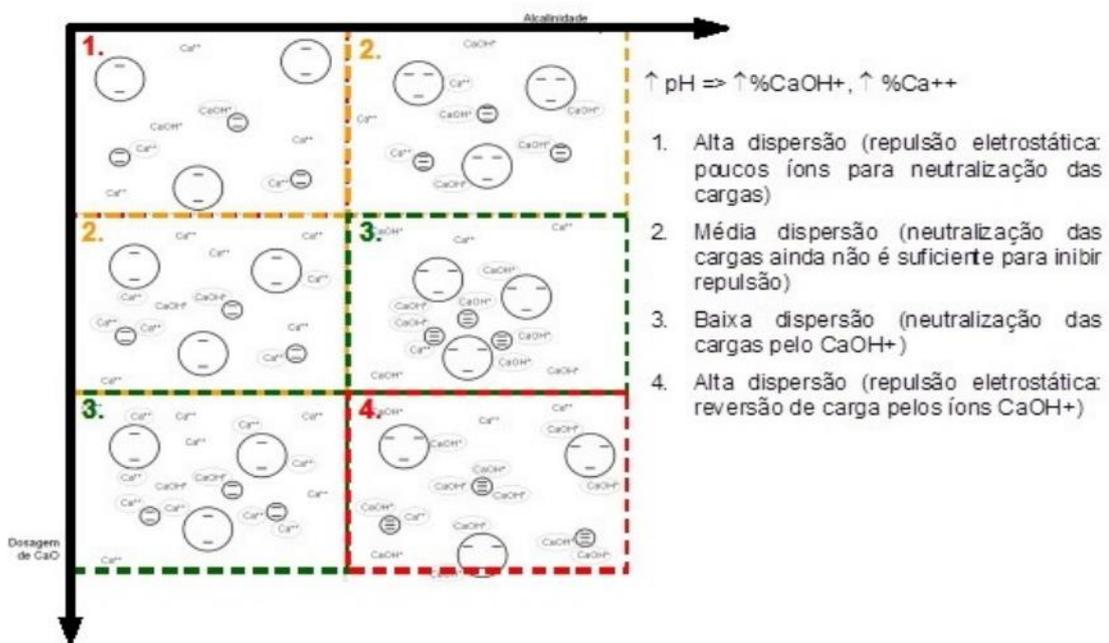


Figura 3: Variação da dispersão do sistema em função do pH e da dosagem de CaO.

Fonte: TURRER *et al.* (2010).

No cenário 1, tem-se baixa dosagem de cal no sistema, de modo que a concentração dos íons $CaOH^+$ e de Ca^{2+} não é capaz de neutralizar a carga negativa das partículas de minério. No cenário 2, uma maior dosagem de cal, aumenta a concentração dos íons $CaOH^+$ e Ca^{2+} , que por sua vez, são capazes de neutralizar uma maior quantidade de partículas, diminuindo a dispersão do sistema. No cenário 3, a dosagem extra de cal, acarreta o aumento da concentração dos íons $CaOH^+$ e Ca^{2+} , capaz de neutralizar quantidade expressiva de partículas, gerando baixa dispersão no sistema. A neutralização ocorre por adsorção química através da ligação dos íons

CaOH⁺ às partículas de minério e por adsorção física através da ligação dos íons Ca²⁺ às partículas de minério. Já no cenário 4, a dosagem excessiva de cal provoca uma concentração expressiva de íons CaOH⁺ e Ca²⁺, que ocasiona a reversão da carga superficial das partículas, gerando novamente, a alta dispersão do sistema.

Marani *et al.* (2004) estudaram a eficiência da cal como coagulante em uma estação de tratamento de esgoto na cidade de Roma, com partículas predominantemente na faixa de 25-50 µm. O trabalho realizado em planta piloto com pH ótimo de 9, resultou em um aumento na eficiência média de remoção de DQO (demanda química de oxigênio), em torno de 65%, induzindo a remoção quase completa da faixa granulométrica considerada. Foi utilizada uma média de 57 mg/L de dosagem de cal. Os autores concluíram que o benefício adicional do tratamento com cal deve-se ao aumento do grau de desinfecção que normalmente não é obtido no tratamento convencional, em que a eficiência da remoção de DQO é cerca de 35%.

Pinto (2018) estudou a eficiência da cal como coagulante na remoção de matéria orgânica, medido pelo CQO (carência química de oxigênio), e na remoção de sólidos presentes nas amostras, medido pelo SST (sólidos suspensos totais). Os estudos consistiram em ensaios de coagulação, floculação e decantação através de amostras colhidas das estações de tratamento de água da Fernão Ferro, Castelo Branco e Évora. A partir de diferentes dosagens e pH aplicados, ele obteve pH ótimo de 10,7 e dosagem de 600 mg/L de cal, o que permitiu eficiência de 64% de remoção de CQO e 99,9% de remoção de SST. Ele inferiu que as elevadas quantidades de cal proporcionam um aumento na quantidade de concentração dos coloides na água residual, o que potencializa a colisão entre as partículas, e conseqüentemente, favorece a coagulação e a sedimentação das mesmas.

Silva (2003) realizou estudos com amostras de efluente de um reator UASB, que trata o esgoto doméstico bruto, a fim de verificar a eficiência da cal com a adição de carbonato de cálcio (CaCO₃) como agente de nucleação. Os resultados demonstraram que com o uso de 600 ppm de CaCO₃, 400 ppm de CaO e pH 7,2, houve remoção de 94% de DQO, 94,7% de SST e 93% de fósforo. O autor depreendeu que a utilização conjunta da cal com o carbonato de cálcio no tratamento de efluentes favoreceu o processo de coagulação e floculação, contribuindo na remoção de matéria orgânica e sólidos residuais, e dessa forma, aumentando a eficiência do sistema de tratamento.

A Tabela 2 apresenta resultados de diversos autores em relação ao uso da cal como coagulante.

Tabela 2: Doses de cal aplicadas, pH induzidos e eficiências de remoção atingidas

Tipo de ensaio	pH	Dosagem (mgCaOH)₂/L	Remoção de CBO (%)	Remoção de CQC (%)	Remoção de SST (%)	Remoção de fósforo (%)	Referência
Piloto	9,5	200-300	76	76	-	90	(Villiers, Berg, Brunner, & Masse, 1970)
Piloto	9,5-9,6	-	60	-	77	80	(Kolarik & Priestley, 1995)
Piloto	9	152-327	-	55-70	35-70	-	(Marani, Ramadori, & Braguglia, 2004)
Jar-test	11,5	380	-	-	-	<1mg/l	(Martel et al., 1975)
Piloto	11,6	300-400	-	75	81	93	(Martel et al., 1975)
Piloto	11 11,5	400 500	69 74	- -	76 79	75 90	(Horstkotte, Niles, Parker, & Caldwell, 1974)
Piloto	9,5	150	60	-	90	80	(Schmid & Mckinney, 1969)

Fonte: adaptado de PINTO (2018).

Segundo Pearse (2003) a utilização de cal é um amparo no processamento de minerais, pois coagula, eleva o pH, deprime os sulfetos de ferro, mantém o cianeto em solução caustica através da remoção de íons carbonatos. Enquanto a utilização da cal dominou os sistemas de altos sólidos, os sais de alumínio e férricos dominaram o mercado dos coagulantes inorgânicos para a clarificação de baixos sólidos, tal como no escoamento das minas, devido à sua hidrólise inerente, produzindo oligômeros catiônicos altamente catiônicos.

De acordo com Bragança (2008), a cal compreende seis produtos resultantes da calcinação de calcários, calcários magnesianos e dolomitos – hidratados ou não, sendo estes: cal virgem cálcica (óxido de cálcio, CaO), cal cálcica hidratada (hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂), cal dolomítica virgem (óxidos de cálcio e de magnésio, CaO.MgO), cal dolomítica hidratada normal tipo N (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio,

$\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}$), cal dolomítica hidratada especial tipo S (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$) e a cal hidráulica.

A cal virgem é obtida pela decomposição térmica do calcário, dolomito ou concha calcária. Quando provém de rochas carbonatadas puras, a cal virgem resulta em um inorgânico branco. Quando detém impurezas, apresenta colorações creme, amarelada e levemente cinza (BRAGANÇA, 2008). A cal -virgem e hidratada- está entre os produtos de maior consumo mundial devido às suas abundantes aplicações.

3.4.2 Floculação no beneficiamento mineral

A floculação promove a agregação de partículas finas em forma de flocos por meio da ação de um polímero solúvel em água, chamado floculante. Estes podem ser naturais, modificados ou sintéticos; neutros, aniônicos ou catiônicos e de baixo, médio ou elevado peso molecular. Os floculantes atuam na superfície das partículas reduzindo as forças repulsivas e aumentando as forças atrativas (BALTAR, 2010).

A floculação acontece por meio de três mecanismos: (i) formação de pontes, (ii) floculação por reversão de carga localizada ou (iii) neutralização das partículas. A finalidade da adição de floculantes é formar os flóculos que ao aumentar de tamanho fazem aumentar a velocidade de sedimentação permitindo a clarificação dos líquidos (BARREDA, 2008).

São observados quatro mecanismos de adsorção da poliacrilamida, sendo eles: (i) ponte polimérica, (ii) neutralização de carga, (iii) formação de complexo polimérico ou (iv) floculação pelos polímeros livres (PENNA, 2009).

De acordo com Pearce (2003), a criação dos floculantes à base de poliacrilamida de alta massa molecular foi revolucionário e eficiente para a separação sólido-líquido na indústria de processamento de minerais.

A poliacrilamida e seus derivados predominam amplamente em operações de separação sólido-líquido na indústria mineral. De acordo com Turrer (2007), os polímeros sintéticos podem ser aniônicos, catiônicos e não-iônicos (Figura 4).

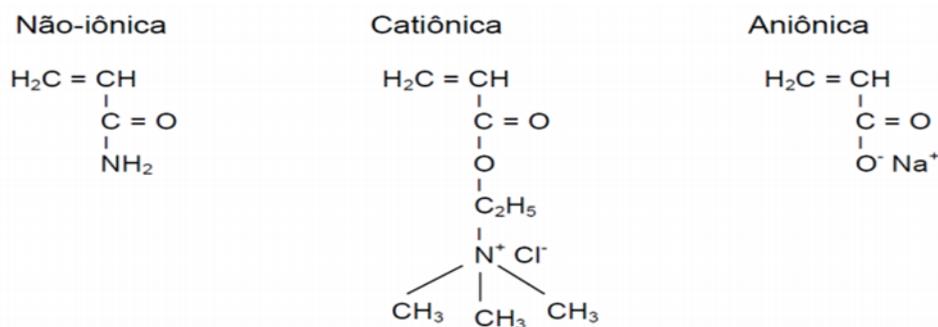


Figura 4: Estrutura de monômeros de poliacrilamida.

Fonte: TURRER (2007).

Um detalhe importante está na análise da carga iônica em relação ao cátion metálico, como mostra a Figura 5.

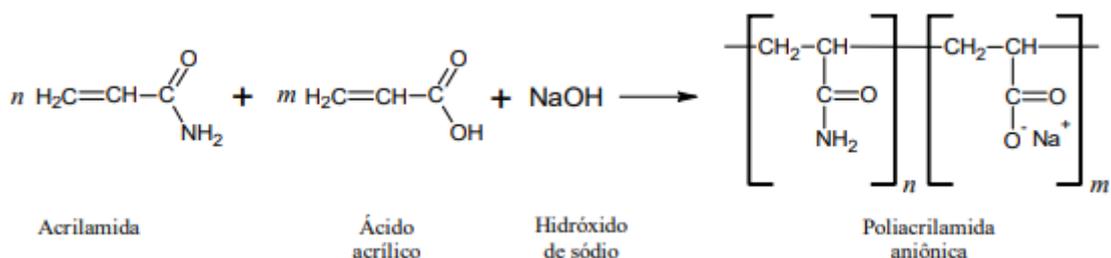


Figura 5: Reação para obtenção da poliacrilamida.

Fonte: NASCIMENTO (2017).

Um sistema com íons metálicos permite que haja maior interação eletrostática entre esses íons e a poliacrilamida em sua forma aniônica. Comercialmente, se encontram as poliacrilamidas em flocos pequenos e brancos. Ela possui boa solubilização e quando agitada se dissipa até o meio tornar-se translúcido (NASCIMENTO, 2017).

Segundo Jin, Hu e Hou (1987), as poliacrilamidas adsorvem-se na superfície do quartzo por pontes de hidrogênio e por forças de London van der Waals. De acordo com estudos realizados por Dash *et al.* (2011), a poliacrilamida não iônica adsorve três vezes mais que a poliacrilamida aniônica, porém a taxa de sedimentação desta é maior que a daquela.

3.5. Potencial zeta

Potencial zeta pode ser definido como o potencial elétrico no plano de cisalhamento entre o movimento da partícula e do líquido em que ela se encontra, na presença de um campo elétrico. Esse deslocamento da dupla camada elétrica leva ao surgimento de um potencial eletrocinético que pode ser medido através da eletroforese, potencial de sedimentação, potencial de escoamento e eletrosmose (HUNTER, 1981, *apud* LUZ, SAMPAIO E FRANÇA, 2010).

O potencial zeta para o quartzo definido por Lopes e Lima (2009), é mostrado na Figura 6. Segundo os autores, o ponto isoelétrico (PIE) do quartzo ocorre no pH 1,8; mas este pode sofrer variações, dependendo da oxidação ou das características do mineral.

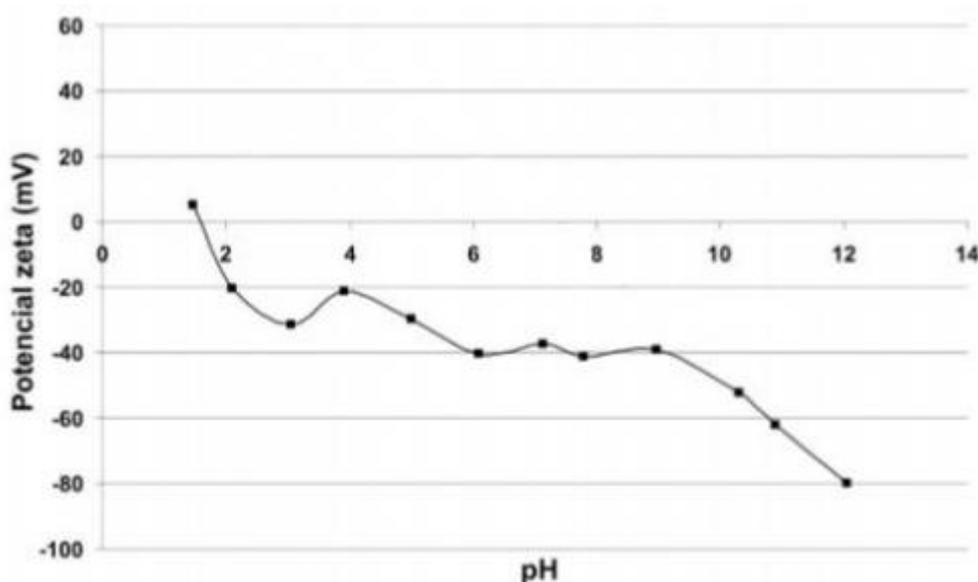


Figura 6: Potencial zeta do quartzo condicionado em água destilada.

Fonte: LOPES E LIMA (2009).

Dash *et al.* (2011) demonstrou que o aumento na dosagem do flocculante poliacrilamida provoca a diminuição da carga das partículas do rejeito de minério de ferro em pH 10. Essa diminuição no potencial zeta pode ser devido ao efeito da mudança no plano de cisalhamento da superfície da partícula. Além disso, Hunter (1981, *apud* Dash *et al.*, 2011) relatou que os íons Ca^{2+} , testados em nos minerais caulinita, quartzo e hematita, hidrolisam em pH 10 para formar $\text{Ca}(\text{OH})_2$, permitindo a diminuição da carga superficial de rejeitos devido a adsorção das espécies hidrolisadas de Ca^{2+} presentes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras secas de quartzo utilizadas para o teste de dispersão foram cedidas pelo laboratório de Análises Químicas do DEMIN/UFOP, já com a granulação adequada (abaixo de 38 μ m) e com densidade dos sólidos especificada (2,65 g/cm²). A metodologia da preparação da amostra e a pureza do quartzo confirmada por análise de difração de raios X se encontram no trabalho realizado por Leite (2019). Toda a preparação e os testes foram feitos no laboratório que cedeu as amostras.

4.1. Testes de agregação

Os testes de agregação foram divididos em três estágios. O primeiro na presença de floculante aniônico, o segundo, com adição do coagulante e, o terceiro, com adição do floculante após a coagulação das partículas.

4.1.1. Estágio 1: testes com adição de poliacrilamida

Foram utilizadas soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e/ou ácido clorídrico (HCl) como reguladores de pH e os testes abrangeram os valores de pH 8, 9 e 10 com medidas realizadas em pHmetro Quimis Q400AS. Na metodologia, com as devidas adaptações de Orumwense e Nwachukwu (2000), foram utilizadas misturas de quartzo e água destilada com 5% de sólidos, em tubo de *Galery* com volume total de polpa de 200 mL.

A realização dos testes baseou-se em (LEITE, 2019):

- Adição dos sólidos e água destilada no tubo de *Galery*;
- Homogeneização da polpa;
- Medição e ajuste do pH;
- Adição do polímero floculante com tempo de condicionamento de 1 minuto;
- Sedimentação do material por 4 minutos (testes foram realizados em duplicada. Foi determinado o tempo de 4 minutos de sedimentação para o quartzo com base na lei de Stokes);
- Recolhimento da fração afundada e secagem da mesma em estufa a 100°C.

A adição do floculante poliacrilamida aniônica ocorreu na concentração de 1 mg/L à polpa em agitação. O pH foi medido e, quando necessário, ajustado com os reguladores.

A mistura foi agitada durante um minuto com o auxílio do agitador magnético, e, posteriormente, sedimentada, sifonada e secada.

4.1.2. Estágio 2: testes com adição de cal

Procedimentos ocorreram conforme descrito no item 4.1.1, com a diferença da adição de solução 30 mg/L do coagulante cal. Após a adição do reagente, o pH foi medido e, quando necessário, ajustado com as soluções básicas e/ou ácidas referidas anteriormente.

A mistura com a cal foi agitada com o auxílio do agitador magnético, e, posteriormente, sedimentada, sifonada e secada.

4.1.3. Estágio 3: testes com adição do floculante após a coagulação das partículas

No terceiro estágio foi realizado a adição dos sólidos e água no tubo *Galery*, que foi homogeneizada. Foi adicionado a dosagem de 1 mg/L do floculante poliacrilamida à polpa após a adição da cal na dosagem de 30 mg/L. Em seguida, o pH foi medido e, quando necessário, ajustado com as soluções básicas e/ou ácidas referidas anteriormente.

A mistura contendo o coagulante e o floculante foi agitada durante um minuto com o auxílio do agitador magnético, e, posteriormente, sedimentada, sifonada e secada.

A porcentagem de material sedimentado, em todos os estágios, foi calculada a partir da Equação 2:

$$GA(\%) = \frac{mafundada}{minicial} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- *minicial* = massa inicial;
- *mafundada* = massa afundada

A dosagens de poliacrilamida (1 mg/ L ou 20 g/t) e da cal (30 mg/L) foram estabelecidas conforme estudo prévio da literatura sobre as dosagens usuais destes reagentes no processo industrial.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Testes de agregação

Foram também realizados testes em branco (sem adição de nenhum reagente) para verificação da sedimentação natural do quartzo.

5.1.1. Amostras com adição do floculante

Nos testes de agregação do quartzo com a adição da poliacrilamida na dosagem de 1mg/L, foi possível observar, conforme a Figura 7, que independente do pH utilizado, a fração de sólidos sedimentados não ultrapassa 45%, o que corrobora os estudos realizados por Leite (2019). Comparando os resultados obtidos nos testes em branco com o floculante, é possível verificar a persistência natural do quartzo em se manter suspenso na solução. Esse fato pode ser justificado pela distância com o ponto isoelétrico do quartzo, que ocorre no pH 1,8; conforme mostra a Figura 6. Dessa forma, como os valores de pHs estudados estão longe do ponto isoelétrico do quartzo, as partículas se encontram muito dispersas no sistema, dificultando a floculação. Ademais, segundo Leite (2019), a dosagem de coagulante/floculante e o valor de pH são imprescindíveis para se obter a agregação ideal, de forma que esta ocorre no ponto isoelétrico do mineral, ou seja, quando o potencial zeta for nulo.

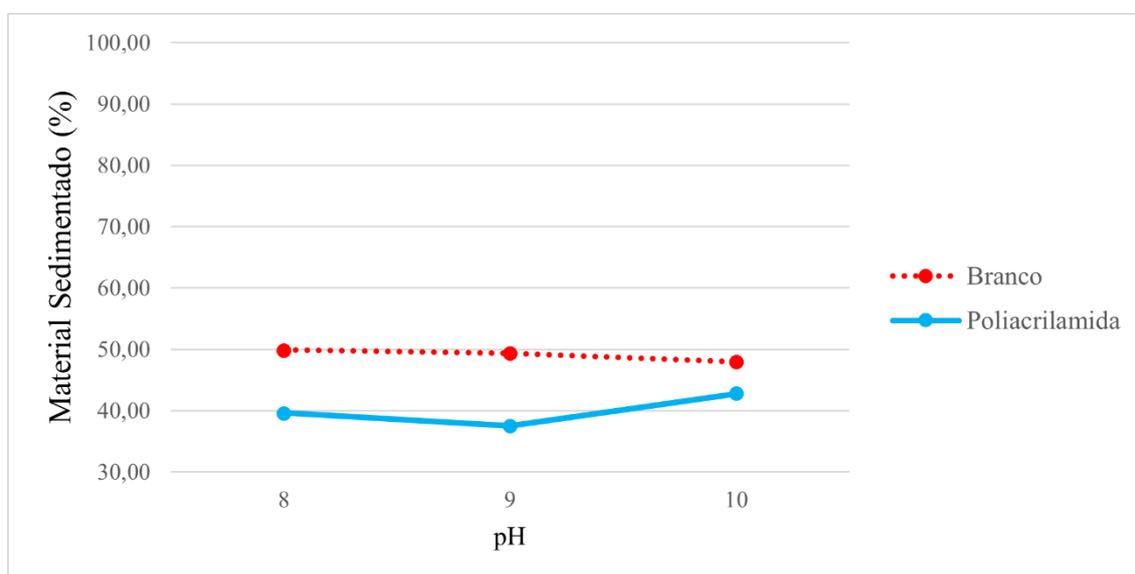


Figura 7: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com adição de poliacrilamida e sem adição de reagentes.

5.1.2. Amostras com adição do coagulante

Nos testes de agregação do quartzo com a adição da cal na dosagem de 30 mg/L, foi possível observar, conforme mostra a Figura 8, que nos valores de pH 8 e 9 não houve diferença significativa de material sedimentado em relação aos testes em branco (cerca de 50%). Já no valor de pH 10 com adição da cal, o material sedimentado chegou a resultados superiores à 77%, demonstrando que há formação de coágulos nessa faixa de pH. Esse fato demonstra que a alcalinidade da solução e a adição da cal favorece a colisão das partículas, incrementando a formação dos flocos (MINTON & CARLSON, 1976 *apud* PINTO, 2018).

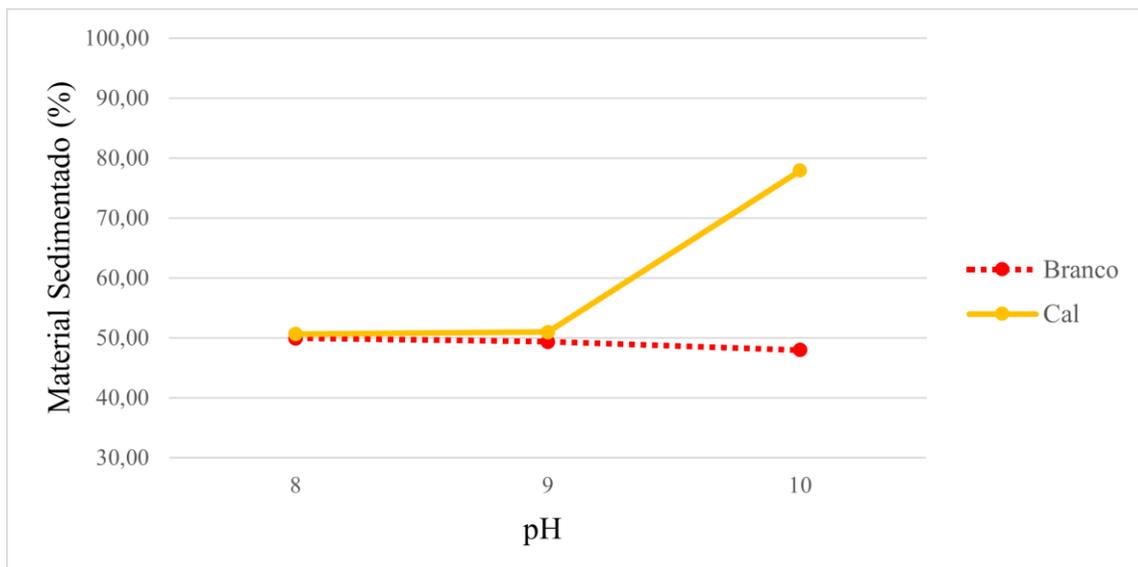


Figura 8: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com adição de cal e sem adição de reagentes.

A cal adicionada a polpa reage com a água e forma o hidróxido de cálcio, conforme a Equação 3:



O hidróxido de cálcio formado se dissocia em Ca^{2+} e CaOH^+ , de forma que libera íons OH^- que alteram o pH da solução e o estado de agregação das partículas.

Conforme descrito por Souza (2014), há uma variação da dispersão do sistema em função da dosagem de cal e da alcalinidade, o que permite a neutralização ou diminuição da carga superficial negativa das partículas.

A cal, através de seus íons Ca^{2+} e CaOH^+ , interagem com a superfície do quartzo reduzindo a repulsão eletrostática e permitindo a coagulação (SOUZA, 2014).

De acordo com o diagrama de especiação da cal (conforme Figura 2), é possível analisar que a partir do pH 10 há a formação dos íons Ca^{2+} e CaOH^+ que se adsorvem na superfície negativa do quartzo, neutralizando e aproximando as partículas finas, de modo que ocorra a coagulação.

5.1.3. Amostras com adição do floculante após a coagulação das partículas

Nos testes de agregação do quartzo com a adição da poliacrilamida na dosagem de 1mg/L após a adição da cal na dosagem de 30 mg/L, não houve uma melhora significativa nos valores de pH 8 e 9, como mostra a Figura 9. Eckenfelder (1989), evidenciou que os melhores valores para ação coagulante da cal encontram-se na faixa de pH entre 9-11. É presumível que para esses valores de pHs seja necessário o aumento na dosagem de cal para que haja a formação de coágulos. Também é plausível verificar que no pH 8 a fração de material sedimentado foi superior ao pH 9. Isso pode ser devido ao fato de que no pH 9 o sistema se encontra mais disperso, dificultando a agregação das partículas.

É possível observar que os melhores resultados ocorreram novamente no valor de pH 10, com material sedimentado de 95%, já que neste valor houve a formação de coágulos.

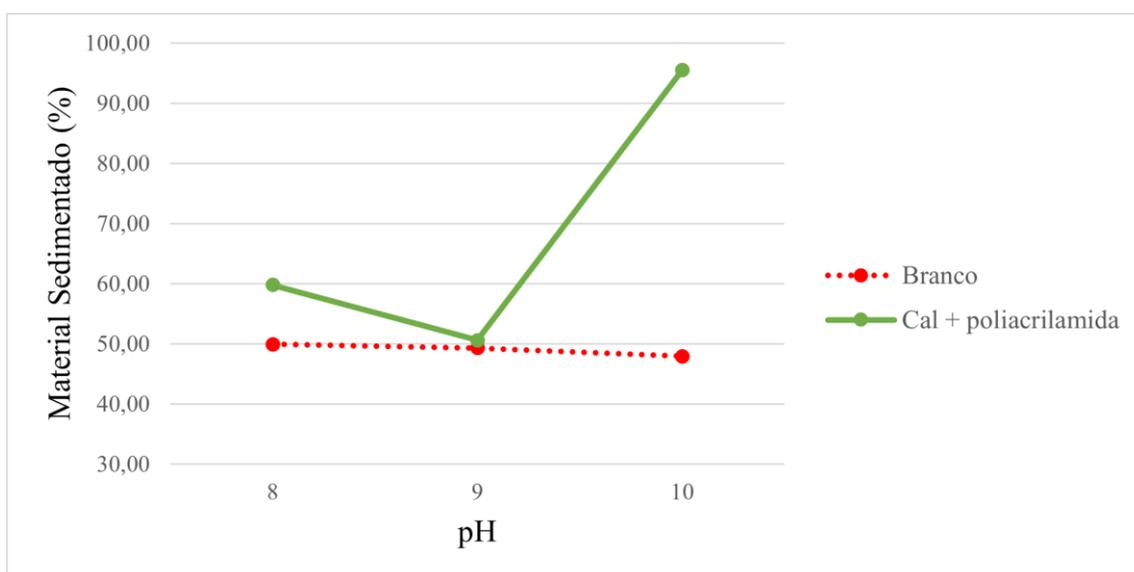


Figura 9: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com adição de cal e poliacrilamida e sem adição de reagentes.

A consequente formação de flocos através da coagulação permite uma melhor adsorção da poliacrilamida aniônica na superfície da partícula, gerando um aumento no tamanho e na massa específica que proporciona a sedimentação do material. Dash *et al.* (2011) confirmaram em seus estudos que os íons Ca^{2+} hidrolisados ajudam na adsorção da poliacrilamida na superfície das partículas, ocasionando o aumento na taxa de sedimentação.

5.1.4. Análise geral dos testes de agregação das partículas finas de quartzo

Diante de todos os resultados dos testes de agregação, de acordo com a Figura 10, é possível deduzir que:

- Nas faixas de pH estudadas, a cal sozinha na dosagem de 30 mg/L e pH 10 é capaz de coagular o quartzo, mas o mesmo não se observa nas faixas de pH 8 e 9;
- Nas faixas de pH estudadas, a poliacrilamida sozinha na dosagem de 1 mg/L, independentemente dos valores de pH utilizados, não é capaz de flocular o quartzo;
- Não houve melhora na eficiência da poliacrilamida após a coagulação das partículas de quartzo nas faixas de pH 8 e 9;
- O melhor resultado de sedimentação das partículas de quartzo foi verificado no pH 10 e com a adição de cal e poliacrilamida, com material sedimentado superior a 95%.

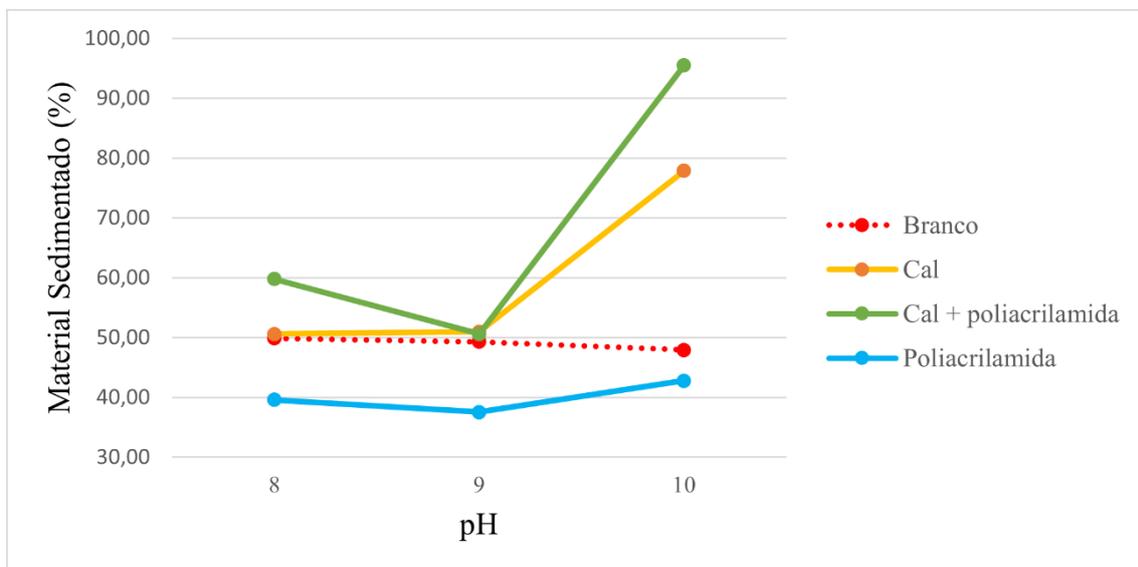


Figura 10: Análise da porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa com e sem adição de todos os reagentes utilizados.

6. CONCLUSÃO

A partir deste trabalho foi possível avaliar o desempenho da cal como coagulante em partículas finas de quartzo, além de verificar a eficiência da poliacrilamida após a coagulação dessas partículas.

O valor de pH em que favorece a formação de coágulos foi o pH 10, quando se utilizou uma dosagem de 30mg/L de cal.

A poliacrilamida sozinha não foi eficiente na floculação das partículas finas de quartzo em nenhum pH estudado.

O melhor desempenho na sedimentação das partículas finas de quartzo foi o resultado para pH 10, na adição da poliacrilamida após a adição da cal, onde 95,5% do material foi sedimentado.

É necessário a realização de estudos futuros com diferentes dosagens de cal para analisar qual dos resultados poderia ser aplicado para maior eficiência da agregação de partículas finas de quartzo.

REFERÊNCIAS

- BALTAR, C.A. M. **Processos de Agregação**. Tratamento de minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora CETEM/MCT, 2010. Cap. 13, p. 559 – 587.
- BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. Orientador: George Eduardo Sales Valadão. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MAPO-7RCJDB>. Acesso em: 8 abr. 2021
- 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**. Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MAPO-7R5LBR>. Acesso em: 8 abr. 2021.
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: desaguamento, espessamento e filtragem**. 3.ed. São Paulo: Signus Editora, 2010.
- DASH, M.; DWARI, R. K.; BISWAL, S. K.; REDDY, P. S. R.; CHATTOPADHYAY, P.; MISHRA, B. K. **Studies on the effect of flocculant adsorption on the dewatering of iron ore tailings**. Chemical Engineering Journal, v. 173, n. 2, p. 318-325, 2011.
- DI BERNARDO, A. S. **Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-02122015-112130/pt-br.php>. Acesso em: 8 abri.2021.
- ECKENFELDER JR, W. W. **Industrial Water Pollution Control, McGraw-Hill Book Company**. New York, 1989.
- FILIZZOLA, M.M.O. **Poliacrilamidas na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. Orientador: Antonio Eduardo Clark Peres. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-AC8G97>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, R.G. **Ensaio de sedimentação**. In: SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A., BRAGA, P.F.A. Tratamento de minérios; Práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 23, p. 391 – 408.
- FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. **Separação Sólido-líquido**. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. Tratamento de minérios. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 14, p. 573 – 609.
- GADÊLHA, T.S.; FRANÇA, S.C.A. **Estudo de desaguamento de polpas minerais para a produção de concentrados de alto teor de sólidos**. In: IV Jornada do Programa de Capacitação- CETEM, 2015.

GALEŠA, K.; BREN, U.; KRANJC, A.; MAVRI, J. **Carcinogenicity of Acrylamide: A Computational Study**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 56, n. 18, p. 8720-8727, 2008.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2351>. Acesso em: 21 abr. 2021.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro**. Revista Escola de Minas, v. 64, n. 2, p. 233-236, 2011.

GUEDES, C. D.; PEREIRA, J. G.; LIMA, J. C.; PAIVA, J. F. **Coagulação/Floculação de Suspensões Ricas em Óxido de Ferro por Sulfato de Alumínio**. Química Nova, Volume 27, número 5. Páginas 715-719. 2004.

JIN, R.; HU, W.; HOU, X. **Mechanism of selective flocculation of hematite from quartz with hydrolyzed polyacrylamide**. Colloids and Surfaces, v. 26, p. 317-331, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0166662287801245>. Acesso em: 25 mai. 2021.

LEITE, A. M. C. **Amidos modificados como floculantes de lama de rejeito de minério de ferro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/11905>. Acesso em: 20 mar. 2021.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos da Qualidade e Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Átomo. 2005.

LOPES, L.M. **Otimização do processo de espessamento de rejeito de minério de ferro de Itatiaiuçu-MG**. 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Araxá, 2017. Disponível em: http://www.engminas.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/Larissa_Moreira_Lopes.pdf. Acesso em: 2 jun. 2021.

LOPES, G. M.; LIMA, R. M. F. **Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio**. REM: Revista Escola de Minas, vol. 62, núm. 3, 2009, p. 323-329, Escola de Minas Ouro Preto, Brasil.

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

MAPA, P.S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MAPO-7RCHYY>. Acesso em: 25 mar. 2021.

MARANI, D., RAMADORI, R., RENZI, V., BRAGUGLIA, C. M., DI PINTO, A. C. (2004). **Improving STP Performance by Lime Addition**. In *Enhancing Urban Environment by Environmental Upgrading and Restoration*. pp. 215–226.

MELLO, V. F. B., ABREU, J. P.G., FERREIRA, J. M., JUCÁ, J. F.T., MOTTA, M. A. **Variables in the process of coagulation / flocculation / settling of leachate of municipal landfills**. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 7, n. 2, p. 88-100, aug. 2012.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment**. Disposal and Reuse, 3rd edition, McGraw-Hill. USA. 1991.

NASCIMENTO, Luiz Antonio do. **Aplicação da poliacrilamida na floculação de cátions metálicos**. 2017. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/25228>. Acesso em: 25 mar. 2021.

NETO, G.R.V. **Maximização do desaguamento dos rejeitos minerais gerados pela concentração do minério de ferro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-AC8GQX>. Acesso em: 25 mar. 2021.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/94442>. Acesso em: 30 mar. 2021.

ORUMWENSE, F. F. O.; NWACHUKWU, J. C. **Flocculation studies on hematite-silica system using polymeric flocculants**. *Indian Journal of Chemical Technology*, v. 7, p. 23-29, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282559456_Flocculation_studies_on_hematite-silica_system_using_polymeric_flocculants. Acesso em: 05 jun. 2021.

PARKS, G.A. **Adsorption in the marine environment**. In: RILEY, J.P.; SKIRROW, G., Eds. *Chemical Oceanography*, Academic Press, London, p. 241-308., 1975.

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

PENNA, K.S.F. **Remoção de óleo do meio filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia**. 2009. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8DPFA2>. Acesso em: 25 mar. 2021.

PINTO, A.F.B. **Valorização de insolúveis de cal na operação de decantação primária assistida em tratamento de efluentes**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/77149>. Acesso em: 25 mar. 2021

RODRIGUES, C.C.F; OLIVEIRA, F.J. **Separação sólido- líquido no beneficiamento de minério de ferro**. Faculdade Ietec, Belo Horizonte, p. 1-7, 29 jul. 2017. Disponível em: <https://www.ietec.com.br/clipping/2018/01-janeiro/Separa%C3%A7%C3%A3o-Solido-Liquido-no-Beneficiamento-de-Minerio-de-Ferro.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

SILVA, G.P.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeitos da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 45–52, 2007. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/2171>. Acesso em: 13 jun. 2021.

SILVA, M.C.A; MARTINS, F.L; REIS, E.L. **Avaliação de agentes auxiliares para o tratamento de um rejeito de minério de ferro**. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belém, 23 out. 2017.

SILVA, W. R. **Pós-tratamento com cal de efluentes de sistemas de tratamento de esgoto**. 2003. 111f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2003. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11182>. Acesso em: 20 abr. 2021

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) - Tecnologia Mineral – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9KSFMD>. Acesso em: 01 ago. 2021.

TRAMPUS, B.C; MOURA, C.P.C; FRANÇA, C.P.A. **Estudo da agregação de partículas de rejeito de minério de ferro visando a melhoria do desaguamento**. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belo Horizonte, 4 nov. 2019.

TURRER, H.D.G.; ARAUJO JUNIOR, A.M; DOELLINGER, T.M.; ZUCHI, M.A.; PERES, A.E.C. **Efeito da adição de coagulantes/floculantes na filtragem**. IN: 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 9p. 2010.

VENTURA, R.J. **Efeitos do uso de floculante e coagulante na sedimentação de rejeito de minério de ferro**. 2018. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Araxá, 2018. Disponível em: <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/12/Ricardo-Jeronimo-Ventura-min.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

WIMMER, A. C. S. **Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria petroquímica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11608@1>. Acesso em 15 abr. 2021.