



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



João Octávio Carvalho Sáez Oliveira

FLOCULAÇÃO DOS SISTEMAS HEMATITA-GOETHITA E QUARTZO
UTILIZANDO AMIDO DE MILHO

Ouro Preto
2023

João Octávio Carvalho Sáez Oliveira

**FLOCULAÇÃO DOS SISTEMAS HEMATITA-GOETHITA E QUARTZO
UTILIZANDO AMIDO DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Minas.

Orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira

Coorientadora: Ma. Stephânia da Consolação Silva Nogueira

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482f Oliveira, João Octávio Carvalho Sáez.
Floculação dos sistemas hematita-goethita e quartzo utilizando amido de milho. [manuscrito] / João Octávio Carvalho Sáez Oliveira. - 2023.
58 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira.
Coorientadora: Ma. Stephânia da Consolação Silva Nogueira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Água - Purificação - Floculação. 3. Amidos e féculas - Amido de milho. 4. Sedimentação e depósitos. I. Nogueira, Francielle Câmara. II. Nogueira, Stephânia da Consolação Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.793

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Octávio Carvalho Sáez Oliveira

Floculação dos sistemas hematita-goethita e quartzo utilizando amido de milho

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 maio de 2023

Membros da banca

Dra - Francielle Câmara Nogueira - Orientadora - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr - Vanderson Eney de Matos - (Samarco)
MSc - Mariana Caroline Andrade Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Francielle Câmara Nogueira, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2023, às 15:34, 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 **0520265** e o código CRC **7A03161A**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por iluminar meus passos e escolhas;

À minha família que sempre apoiou meus passos durante toda a minha vida;

À Jucilene por todo apoio durante os momentos difíceis;

Ao professor Carlos Alberto Pereira pela amizade, oportunidades e confiança depositada em mim durante grande parte da graduação;

À minha orientadora Francielle Câmara Nogueira e coorientadora Stephânia da Consolação Silva Nogueira pela atenção e ensinamentos transmitidos;

Aos ex-alunos e moradores da República FG, em que o convívio e compartilhamento de experiências foi enriquecedor para o meu desenvolvimento como engenheiro e principalmente como pessoa;

À Escola de Minas por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade. Me orgulho em fazer parte da sua história.

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada com objetivo de compreender a influência das variáveis: concentração de floculante, tempo de floculação e velocidade de agitação na seletividade da floculação de sistemas individuais formados por hematita-goethita e quartzo, utilizando o amido de milho como floculante. O planejamento dos experimentos foi realizado utilizando o *software* MiniTab®18 através do método estatístico fatorial completo (2^k) com dois níveis e três fatores ($K=3$). Todos os experimentos foram realizados com água destilada, em pH 10,5, utilizando o hexametáfosfato de sódio como dispersante na concentração fixa de 50mg/L. Variou-se a concentração do amido de milho em 5mg/L e 50mg/L, o tempo de floculação em 120 e 300 segundos e a velocidade de agitação em 50 e 150rpm. O cone de Imhoff foi utilizado para medir a volume dos flocos formados nas diferentes condições experimentais. Os resultados comprovaram a seletividade do amido de milho para floculação dos minerais de ferro e indicaram que a agregação desses minerais aumenta com a concentração do floculante e da velocidade de agitação. Para o quartzo, a floculação foi insignificante para todas as condições analisadas. Analisando as curvas de sedimentação, foi possível observar um aumento no volume do material sedimentado, dos sistemas floculados em relação aos sistemas dispersos para ambos minerais, sendo que esse aumento foi muito superior para os minerais de ferro. Por fim, os parâmetros para obter a floculação de forma seletiva, agregando os minerais de ferro e mantendo disperso os minerais de quartzo, foram obtidos nos ensaios realizados com concentração de floculante (50mg/L), tempo de agitação (120s) e velocidade de agitação (150rpm).

Palavras-chave: hematita; goethita; quartzo; amido de milho; floculação; sedimentação.

ABSTRACT

This research was carried out with the objective of understanding the influence of the variables: flocculant concentration, flocculation time, and agitation speed on the selectivity of flocculation of individual systems formed by hematite-goethite and quartz, using corn starch as a flocculant. The experimental design was performed using MiniTab®18 software through the complete factorial statistical method (2k) with two levels and three factors (K=3). All experiments were conducted with distilled water at pH 10.5, using sodium hexametaphosphate as a dispersant at a fixed concentration of 50mg/L. The corn starch concentration was varied between 5mg/L and 50mg/L, flocculation time between 120 and 300 seconds, and agitation speed between 50 and 150rpm. The Imhoff cone was used to measure the volume of the flocs formed under different experimental conditions. The results confirmed the selectivity of corn starch for the flocculation of iron minerals and indicated that the aggregation of these minerals increases with flocculant concentration and flocculation speed. For quartz, flocculation was insignificant for all analyzed conditions. Analyzing the sedimentation curves, it was possible to observe an increase in the volume of sedimented material for the flocculated systems compared to the dispersed systems for both minerals, with this increase being much greater for iron minerals. Finally, the parameters for obtaining selective flocculation, aggregating iron minerals and keeping quartz minerals dispersed, were obtained in the tests performed with a flocculant concentration of 50mg/L, agitation time of 120s, and agitation speed of 150rpm.

Keywords: hematite; goethite; quartz; corn starch; flocculation; sedimentation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partículas com excesso de carga elétrica negativa na superfície e contra íons atraídos.....	13
Figura 2 - Energias de interação entre partículas - teoria DLVO.....	15
Figura 3 - Efeito da concentração de eletrólitos indiferente na compressão da dupla camada elétrica	17
Figura 4 - Configuração do filamento dos polímeros.....	19
Figura 5 - Etapas após a adição de um polímero a uma suspensão – (A) adição, (B) Homogeneização, (C) adsorção, (D) quebra de flocos e (E) floculação.....	20
Figura 6 - (a) difusão das macromoléculas; (b) adsorção dos polímeros na superfície mineral; (c) flocos primários; (d) flocos secundários	21
Figura 7 – Representação do mecanismo de floculação por reversão de carga localizada	22
Figura 8 - Estrutura da amilose (a) e estrutura da amilopectina (b)	25
Figura 9 - Formula química estrutural do silicato de sódio (a) e hexametáfosfato de sódio (b)	26
Figura 10 - Preparação das amostras utilizadas na floculação seletiva	30
Figura 11 - Agitador mecânico na posição de alta rotação (a) e na posição de alto torque (b).....	35
Figura 12 - Reator utilizado nos testes de floculação seletiva.....	35
Figura 13 - Cone de Imhoff.....	37
Figura 14 - Distribuição granulométrica da amostra dos minerais de ferro	39
Figura 15 - Distribuição granulométrica da amostra de quartzo	40
Figura 16 - Difratogramas de raios-X da amostra de minerais de ferro.....	41
Figura 17 - Difratogramas de raios-X da amostra de quartzo.....	41
Figura 18 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis sobre o volume sedimentado dos minerais de ferro (I) e quartzo (II).....	43
Figura 19 - Efeitos principais das variáveis no volume sedimentado dos minerais de ferro (I) e quartzo (II)	44
Figura 20 – Fotomicrografias dos sistemas floculados e dispersos	46
Figura 21 - Curva de sedimentação dos minerais de ferro (I) e do quartzo (II)	47
Figura 22 - Experimentos de sedimentação dos sistemas dispersos (I) e floculados (II)	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação granulométrica das partículas	12
Tabela 2 - Parâmetros de floculante utilizado em diferentes estudos	29
Tabela 3 - Reagentes utilizados para realização dos ensaios	32
Tabela 4 - Níveis superiores e inferiores utilizados no planejamento fatorial	36
Tabela 5 - Sequência dos experimentos de floculação seletiva	36
Tabela 6 - Graduação do cone de Imhoff	38
Tabela 7 – Teores dos elementos químicos presentes na amostra de minerais de ferro	42
Tabela 8 - Volume sedimentado dos flocos dos minerais de ferro e quartzo medidos no cone de Imhoff.....	42

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS POR TAMANHO.....	12
3.2 BENEFICIAMENTO DE PARTÍCULAS FINAS	12
3.3 ESTABILIDADE DE COLOIDES.....	13
3.4 PROCESSOS DE AGREGAÇÃO	15
3.4.1 Coagulação	16
3.4.2 Floculação	18
3.5 FLOCULAÇÃO SELETIVA	23
3.5.1 Reagentes utilizados na floculação seletiva	24
3.6 TRABALHOS SOBRE FLOCULAÇÃO SELETIVA	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS MINERAIS	30
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	31
4.2.1 Análise granulométrica	31
4.2.2 Densidade relativa	31
4.2.3 Caracterização mineralógica	32
4.2.4 Análise química	32
4.3 REAGENTES UTILIZADOS.....	32
4.3.1 Amido milho	33
4.3.2 Hexametáfosfato de sódio	33
4.3.3 Moduladores de pH	33
4.4 EXPERIMENTOS DE FLOCULAÇÃO SELETIVA	34
4.5 CONE DE IMHOFF	37

4.6 EXPERIMENTOS DE SEDIMENTAÇÃO.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	39
5.1.1 Análise granulométrica.....	39
5.1.2 Densidade	40
5.1.3 Caracterização mineralógica.....	40
5.1.4 Análise química	42
5.2 EXPERIMENTOS DE FLOCULAÇÃO	42
5.3 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO	46
6 CONCLUSÕES.....	49

1 INTRODUÇÃO

A escassez de minérios de alto teor tem impulsionado a recuperação de minérios de baixo teor e mineralogias cada vez mais complexas (YUAN *et al.* 2020; LI *et al.*, 2020, ABREU, 2018; SANTOS, 2010). Nestes minérios, os minerais valiosos ocorrem finamente disseminados nos minerais de ganga, exigindo uma cominuição intensa para liberar os minerais antes dos processos de concentração. A moagem fina resulta na geração de partículas ultrafinas, normalmente menores que 10 μm , que precisam ser beneficiadas (LI *et al.*, 2021).

O processo de flotação amplamente utilizado para o tratamento de minério de ferro, possui máxima eficiência para o processamento de partículas com granulometria entre 10 e 150 μm (PERES *et al.*, 2007). A baixa eficiência para o processamento de partículas ultrafinas, com tamanhos inferiores a 10 μm , pode ser atribuída a diversos fatores, tais como: alta área superficial, baixa probabilidade de colisão entre partícula e bolha, pequena massa e arraste hidrodinâmico fazendo com que o teor do concentrado seja afetado negativamente (PEASE, 2006).

A baixa efetividade da flotação para granulometrias finas é responsável pela disposição de enormes quantidades de material fino e ultrafino em barragens de rejeito gerando danos ambientais e econômicos. No Quadrilátero Ferrífero, estima-se que cerca de 5% do minério alimentado na usina de beneficiamento é retirado do circuito na etapa de deslamagem. Este material, denominado lama, possui alta fração de goethita terrosa, e em alguns casos podem apresentar %Fe superiores a 50% que são valores maiores que os teores dos minérios normalmente alimentados na etapa de flotação (42- 45% Fe) (ABREU, 2018; MARTINS *et al.*, 2002; ROCHA, 2008).

Neste cenário, nota-se que o processamento de partículas finas é fundamental para sobrevivência das mineradoras, uma vez que isso significa diminuição do volume de material disposto nas barragens com conseqüente redução do impacto ambiental e aumento da vida útil da reserva (MARTINS *et al.*, 2002). Autores como Baltar (2010) e Testa (2008) relatam que nas últimas décadas, diversas técnicas para a recuperação de finos e ultrafinos com diferentes graus de eficiência foram desenvolvidas, dentre as quais destacam-se a flotação em coluna, processos de

otimização de captura de partículas pelas bolhas e processos que utilizam a agregação das partículas como a floculação seletiva, que será foco de estudo desta pesquisa.

A floculação seletiva é uma técnica alternativa de agregação de partículas finas que consiste na adsorção preferencial de um polímero (floculante) em diversas partículas formando um floco, que posteriormente é separado por floco-flotação, peneiramento, separação magnética e diversas outras técnicas. Embora se tenha um grande potencial, a floculação seletiva não é empregada de forma estabelecida na indústria. Esse fato pode ser atribuído a grande complexidade do processo, pois para que ocorra a seletividade é necessário que o polímero adsorva seletivamente na superfície de um mineral e como o polímero adsorve por diferentes mecanismos (ligações de hidrogênio, interações hidrofóbicas, atração eletrostática e interação química) a sua seletividade é afetada (BALTAR, 2004).

Essas circunstâncias motivaram o desenvolvimento desta pesquisa que foi realizada com o objetivo de avaliar como aspectos fundamentais afetam a seletividade da floculação dos principais minerais de ferro (hematita-goethita) em relação ao quartzo, utilizando amido de milho como floculante. Os resultados visam aumentar o potencial de aplicação da floculação seletiva para beneficiamento de finos de minério de ferro na indústria mineral.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a influência de parâmetros operacionais na seletividade da floculação de sistemas individuais formados por hematita-goethita e quartzo utilizando o amido de milho como floculante.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar a caracterização física, química e mineralógica das amostras minerais estudadas;
- b) Analisar a influência da concentração de floculante, tempo de floculação e velocidade de agitação no processo de floculação;
- c) Construir curvas de sedimentação para ambos sistemas, a partir da melhor condição obtida nos estudos individuais de floculação dos minerais de ferro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura dos temas relevantes para este trabalho.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS PARTÍCULAS POR TAMANHO

A classificação das partículas por tamanho é realizada com o objetivo de controlar as partículas alimentadas em cada etapa do processo de beneficiamento. Porém, não há um consenso na literatura sobre tal classificação, variando em diversos trabalhos e empresas. Dessa forma, nesta pesquisa será adotada a classificação proposta por Somasundaran (1980), expressa na Tabela 1:

Tabela 1 - Classificação granulométrica das partículas

Grossoiro	maiores que	1000 μm
Finos	menores que	100 μm
Ultrafinos	menores que	10 μm
Coloides	menores que	1 μm
Lama	mistura de	Coloides e ultrafinos

Fonte: Somasundaran (1980)

3.2 BENEFICIAMENTO DE PARTÍCULAS FINAS

Segundo Leite (2019), o tamanho das partículas interfere diretamente no beneficiamento, principalmente para partículas finas ($<100\mu\text{m}$). Isso se deve à sua alta superfície específica e baixa massa apresentando desafios significativos para o processo de beneficiamento.

No Brasil, a flotação é a operação unitária mais utilizada para o beneficiamento do minério de ferro. Entretanto, a aplicabilidade deste processo como método de separação é restrita a uma pequena faixa granulométrica, fora da qual a eficácia do método cai substancialmente. Diversas pesquisas mostram que partículas maiores que 300 μm e menores que 10 μm apresentam baixa flotabilidade, se comparados a partículas de tamanho intermediários (LOTTERMANN, 2014). Pease et al. (2006) apontaram alguns desafios relacionados à flotação de partículas ultrafinas. Um desses

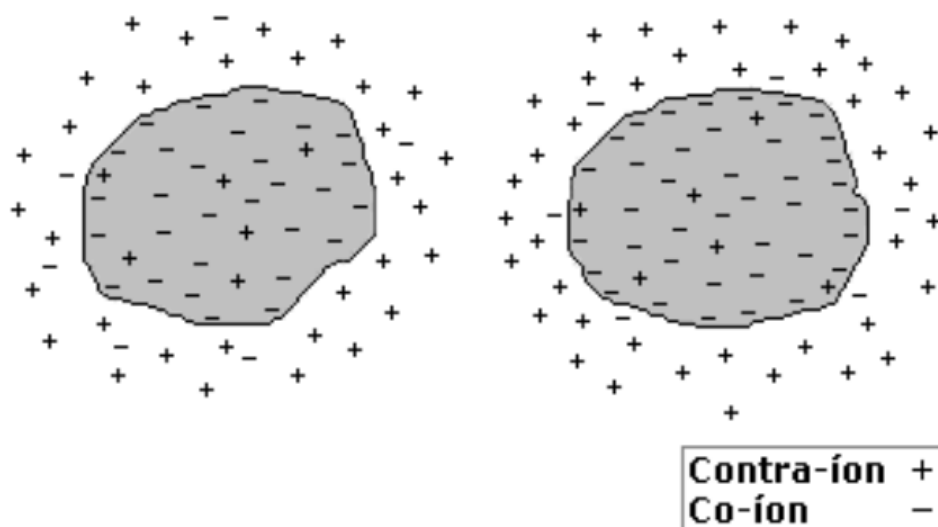
desafios é a alta área superficial das partículas ultrafinas, que pode resultar em um aumento no consumo de reagentes, uma vez que as partículas ultrafinas apresentam uma grande superfície de contato com o reagente. Além disso, devido ao baixo momentum das partículas ultrafinas, o arraste hidrodinâmico é facilitado, o que pode levar a uma redução no teor do concentrado, uma vez que partículas de ganga são recuperadas no concentrado.

Com a dificuldade de beneficiamento de partículas ultrafinas, diversas pesquisas vêm sendo realizadas e várias técnicas têm sido desenvolvidas. Coelho (1974) aponta a floculação seletiva como um grande potencial para a recuperação de partículas nessa faixa granulométrica. Visto que a química superficial coloidal de um sistema de floculação seletiva é muito parecida com a separação por flotação, mudando em alguns aspectos como os polímeros utilizados.

3.3 ESTABILIDADE DE COLOIDES

Uma partícula em suspensão aquosa adquire carga superficial a partir de interações com as moléculas de água e interações entre as espécies iônicas. O excesso de carga na superfície atrai íons de carga contrária que se aproximam para manter a neutralidade elétrica e desta aproximação surge a dupla camada elétrica. A Figura 1 mostra as partículas com excesso de carga elétrica negativa e os contra íons atraídos.

Figura 1 - Partículas com excesso de carga elétrica negativa na superfície e contra íons



Fonte: Baltar (2010)

A teoria DLVO explica a estabilidade de partículas coloidais para sistemas liofóbicos (partículas tendem a ter aversão com solventes polares como a água) considerando as energias de interações influentes na agregação e dispersão de sistemas coloidais. As energias são estimadas através da energia de repulsão (Força entre as duplas camadas elétricas) e da energia de atração (Forças de London – van der Waals) em termos da distância das partículas.

As forças repulsivas (V_r) podem ser calculadas utilizando a Equação (1) (BALTAR, 2004).

$$V_r = 2\pi \epsilon \alpha \zeta^2 \exp(-kd) \quad (1)$$

Onde: (ϵ) permissividade da solução; (ζ) potencial zeta; (κ) inverso da espessura da dupla camada elétrica; (d) distância entre as partículas.

As forças de atração (van der Waals) existentes se originam de interações elétricas e podem ser divididas em três diferentes tipos de atração intermolecular:

- a) Moléculas com dipolos permanentes se orientam mutuamente;
- b) Moléculas dipolares induzem a formação de dipolos em outras moléculas;
- c) Forças atrativas entre moléculas apolares (Essas forças foram explicadas por London (1930) e explicam quase todas as atrações de van der Waals, ficaram também conhecidas como forças de dispersão).

Para o caso de duas partículas de raio α , com distância H sendo muito menor que o raio da partícula, tem-se a Equação (2) para o cálculo de V_a (SHAW, 1975):

$$V_a = \frac{-A \alpha}{12 H} \quad (2)$$

Onde A é a constante de Hamaker e pode ser calculada através da expressão (3):

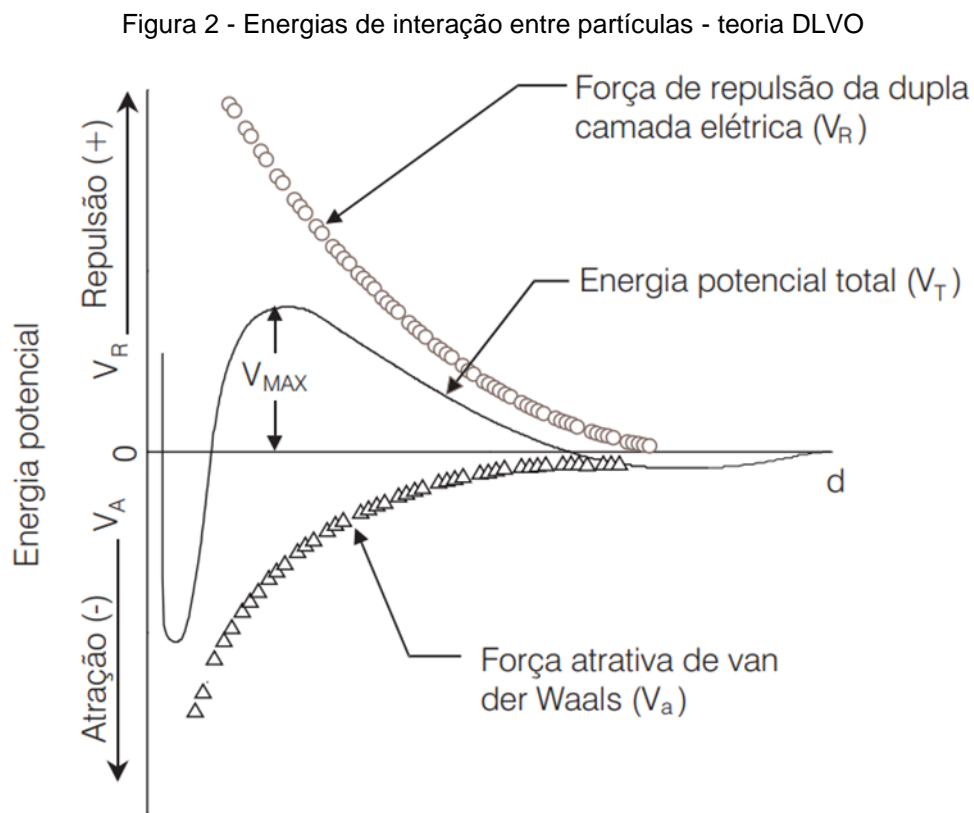
$$A = (\sqrt{A_2} - \sqrt{A_1})^2 \quad (3)$$

Os índices 1 e 2 referem-se ao meio de dispersão e à partícula, respectivamente.

Sabendo que as forças atrativas (V_a) e repulsivas (V_r) são aditivas, podemos calcular a energia potencial total de interação expressa pela Equação (4):

$$V_t = V_r + V_a \quad (4)$$

Na Figura 2 são mostradas as forças repulsivas e atrativas e a energia potencial total de interação, ambas em função da distância de separação entre duas partículas coloidais.



Fonte: JUNIOR et al. (1999)

A energia de repulsão é uma função exponencial, tendo um alcance máximo da espessura da dupla camada elétrica. A energia de atração decresce inversamente a distância entre as partículas de raio iguais. Dessa forma, para distâncias pequenas a atração de van der Waals predominará, enquanto que para distâncias intermediárias a repulsão das duplas camadas elétricas predominará (SHAW, 1975).

3.4 PROCESSOS DE AGREGAÇÃO

Segundo Baltar et al. (2010) há três formas principais para ocorrer o processo de agregação de partículas coloidais:

- a) Coagulação: quando as forças de natureza repulsivas são reduzidas em relação as forças de natureza atrativa, formando um coágulo;
- b) Floculação: quando um polímero de médio/alto peso molecular é adicionado e adsorve-se simultaneamente em diversas partículas, resultando em um agregado chamado de floco.
- c) Aglomeração: ocorre quando partículas são agregadas pela ação de um líquido imiscível, resultando em agregado denominado aglomerado;

Atualmente no setor mineral, apenas a floculação e a coagulação são utilizadas (BALTAR, 2010). Dessa forma, será discutido com profundidade apenas sobre os dois temas.

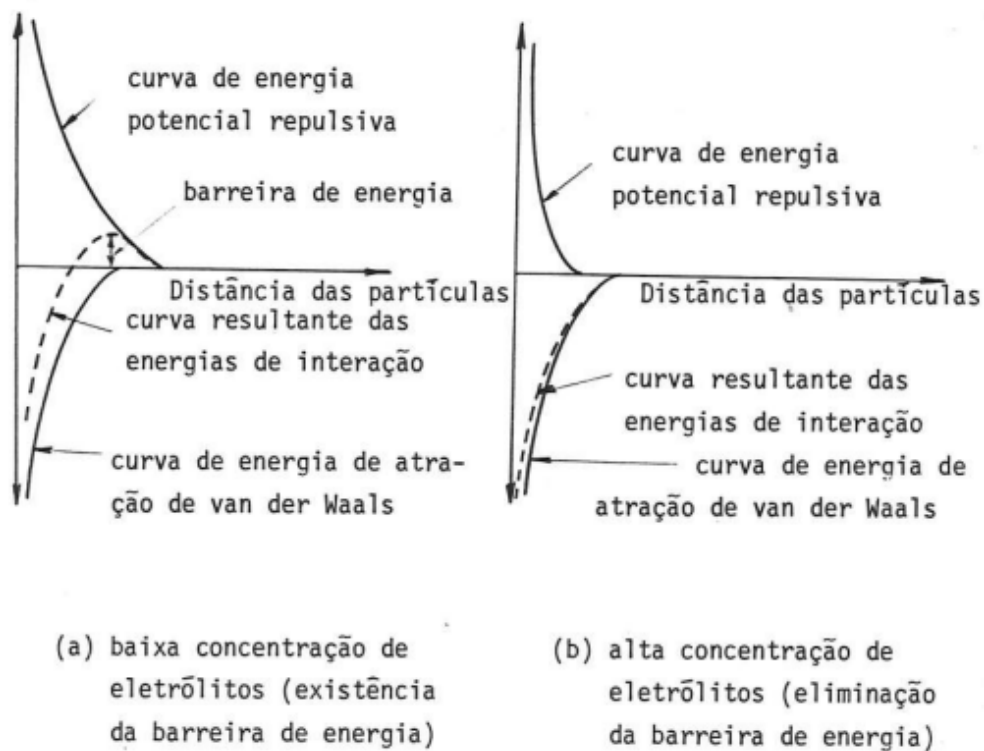
3.4.1 Coagulação

A coagulação é promovida pela adição de um agente denominado coagulante que promove a agregação formando coágulos. A coagulação acontece quando a suspensão é desestabilizada reduzindo e/ou eliminando a repulsão eletrostática entre as partículas, tal processo ocorre quando as forças de superfície de natureza atrativa superam as forças de natureza repulsiva (BALTAR, 2021).

A coagulação é facilitada quando há redução das forças repulsivas (BALTAR, 2004). Analisando a Equação 1 pode-se reduzir as forças de repulsão abaixando o potencial zeta (ζ) ou reduzindo a espessura da dupla camada elétrica ($-κ$), sendo esses os únicos parâmetros que se tem controle. Segundo Mendes et al. (1990) há três mecanismos de coagulação que permitem a minimização da barreira energética:

- a) Compressão da dupla camada elétrica: essa compressão é possível adicionando íons de carga contrária à da superfície do colóide. O eletrólito adicionado não deve realizar nenhum tipo de reação química com a fase dispersante, ou seja, deve ser um eletrólito indiferente. Com a adição de um eletrólito a densidade de íons na camada difusa irá aumentar, resultando em um menor volume para manter a neutralidade elétrica. Esse efeito pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Efeito da concentração de eletrólitos indiferentes na compressão da dupla camada elétrica



Fonte: MENDES (1990)

- b) Adsorção e Neutralização: íons especificamente adsorvidos provocam a redução do potencial zeta. Essa redução ocorre apenas se as cargas elétricas do íon forem opostas à da superfície da partícula. Os principais coagulantes inorgânicos utilizados industrialmente são constituídos pelos íons Fe^{3+} e Al^{3+} que se adsorvem na superfície das partículas carregadas negativamente e reduzem o potencial superficial, diminuindo a barreira energética entre as duas partículas.

- c) Varredura (“*sweepflocculation*”): com a variação do pH, da quantidade de coagulante adicionado e da concentração de alguns íons pode ocorrer a formação de precipitados, sendo removidos após a sedimentação. Esse processo sofre maior influência com a variação do pH e da solubilidade de compostos de hidróxido.

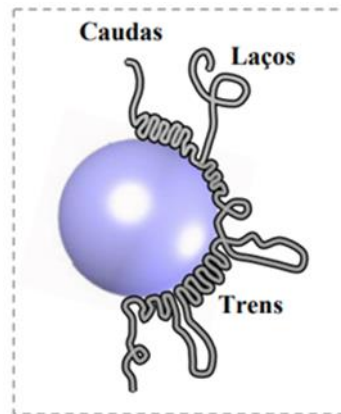
3.4.2 Floculação

Baltar (2021) define floculação sendo a agregação de partículas ultrafinas obtida através de uma macromolécula (polímero) que possui grande dimensão e pode se adsorver ao mesmo tempo em várias partículas. O polímero é denominado floculante e o agregado formado recebe o nome de “floco”.

Os polímeros podem ser de origem natural modificados ou sintéticos sendo classificados em neutros, catiônicos ou aniônicos e se diferenciar pelo peso molecular (PM): baixo ($10^4 > PM > 10^5$) e elevado ($10^6 > PM > 10^7$) (BALTAR, 2010).

A configuração que os filamentos dos polímeros podem assumir quando entram em contato com as partículas sólidas são: cauda, laço e trens conforme apresentados na Figura 4. A conformação do tipo trens é caracterizada por uma série consecutiva de segmentos em contato com a superfície da partícula. Um laço consiste em um segmento em contato apenas com o solvente, ligado por um trem na superfície de cada lado. Já a cauda está ligada no fim de um trem e fica “pendurada” na solução (LUCKHAM e ROSSI, 1999)

Figura 4 - Configuração do filamento dos polímeros



Fonte: KITCHENER (1972)

Segundo Baltar (2010) os polímeros que compõem a classe de floculantes, podem adsorver sobre a superfícies dos minerais por diferentes tipos de ligação, sendo as mais importantes: ligações de hidrogênio, ligações de van der Waals e interações eletrostáticas.

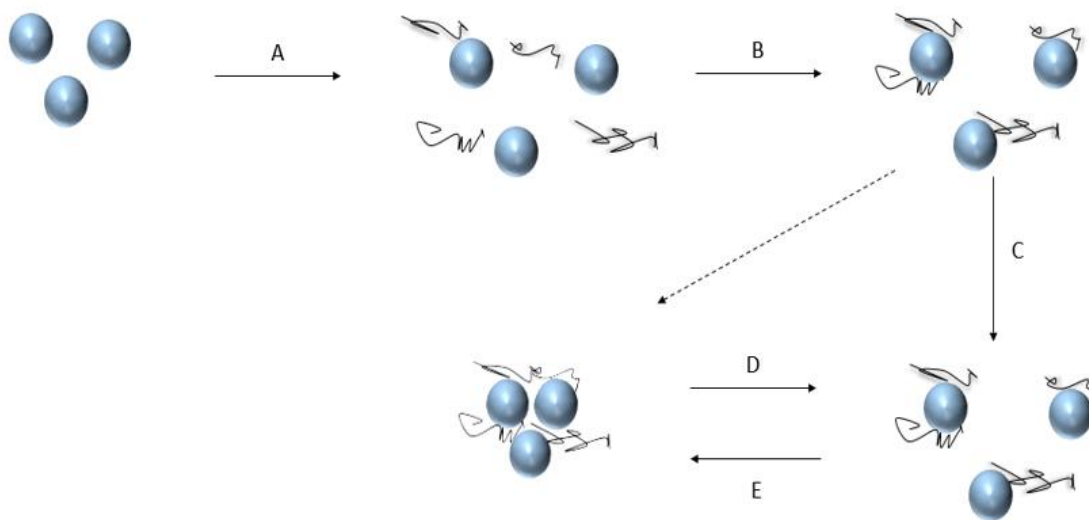
A ligação de hidrogênio é o principal mecanismo na adsorção de polímeros em superfícies minerais. Como o átomo de hidrogênio possui um pequeno raio atômico e uma grande tendência de se tornar positivamente polarizado, ele se liga a outros átomos eletronegativos (BALTAR, 2010). Essas ligações não possuem uma energia muito alta estando entre 10 e 40 KJ.mol^{-1} , assim elas são constantemente feitas e desfeitas (ROSE; JOHN, 1985). Segundo Abreu (2018) a adsorção por ligação de hidrogênio não é seletiva, sendo indicado para quando se deseja a floculação em massa.

Kitchener (1992) ressalta que as adsorções por interações eletrostáticas ocorrem em sua totalidade quando a superfície do mineral e do polímero apresentam cargas contrárias, sendo assim a principal maneira de adsorção dos floculantes catiônicos na superfície dos minerais carregados negativamente.

A adsorção por ligações químicas é resultado de uma interação química entre a molécula do polímero e os sítios metálicos da superfície do mineral, por se tratar de uma adsorção específica ela contribui para uma floculação seletiva (ATTIA, 1992).

Segundo Gregory (1988) o processo de floculação ocorre em diferentes etapas: homogeneização do polímero com as partículas, adsorção do polímero, rearranjo das cadeias adsorvidas, formação de agregados (flocos) e quebra dos flocos. Embora esses processos ilustrados na Figura 5 apareçam sequenciados, na prática eles ocorrem de forma simultânea.

Figura 5 - Etapas após a adição de um polímero a uma suspensão – (A) adição, (B) Homogeneização, (C) adsorção, (D) quebra de flocos e (E) floculação



Fonte: Adaptado de GREGORY (1988)

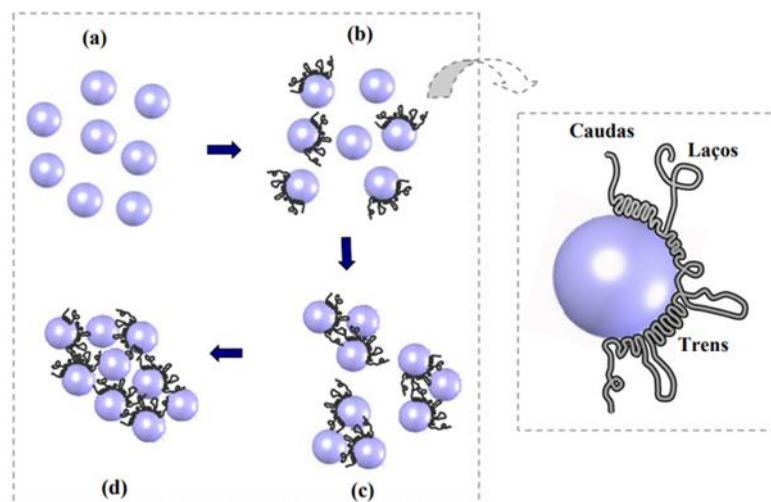
Para que haja agregação é necessário que o sistema esteja sob agitação, pois com um aumento de turbulência, a probabilidade de um maior número de colisões entre as partículas aumenta, intensificando assim a velocidade da formação dos flocos. No entanto, deve-se atentar a velocidade da agitação, respeitando a velocidade limite que está relacionada ao começo do processo de ruptura entre a molécula do polímero e a partícula (BALTAR, 2010).

De acordo com Baltar (2010) os dois principais mecanismos de floculação são a floculação por pontes (*bridging flocculation*) e a floculação por reversão de carga localizada (*patch flocculation*).

O mecanismo de floculação por pontes (Figura 6) é observado em sistemas que utilizam polímeros de elevado peso molecular, não-iônicos ou com carga elétrica de

mesmo sinal da superfície mineral. Neste caso, apenas uma parte da molécula interage diretamente com o sólido. A outra parte da cadeia do polímero estende-se em forma de “alças” e “caudas” na fase aquosa possibilitando o contato e a adsorção de outras partículas. Portanto, para que as pontes sejam formadas, é necessário que a extensão das alças e caudas seja maior que a distância de repulsão entre partículas (MAGDASSI e RODEL, 1996).

Figura 6 - (a) difusão das macromoléculas; (b) adsorção dos polímeros na superfície mineral; (c) flocos primários; (d) flocos secundários



Fonte: KITCHENER (1972).

Os flocos formados por pontes são grandes, possuem estrutura aberta, forma helicoidal e aprisionam água em seu interior, mas apesar da água retida diminuir a densidade média, esses flocos apresentam alta velocidade de sedimentação, devido ao tamanho, sendo apropriados para operações de espessamento (ERIKSSON, et al., 1989; BALTAR, 2010). A reconstrução dos flocos destruídos pelas tensões de cisalhamento é mais difícil nos sistemas onde predomina esse tipo de mecanismo, devido à quebra de moléculas do polímero (YOON, S. Y., & DENG, YULIN, 2004).

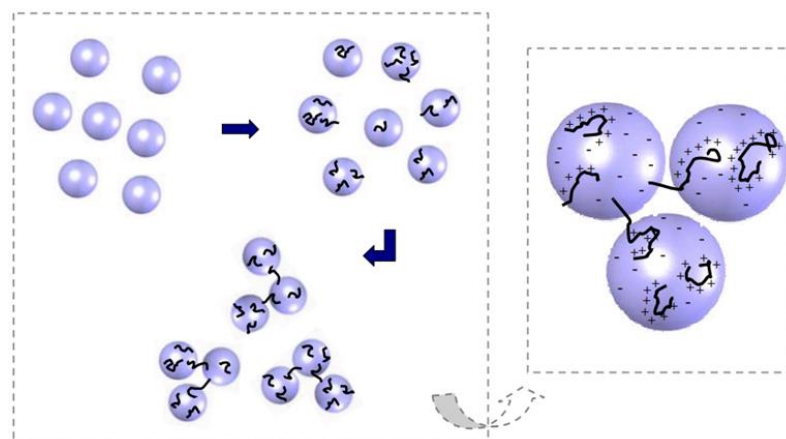
Kirwan (2002) discute sobre a importância da concentração do floculante no processo de floculação. O autor salienta que a utilização de altas concentrações de floculante pode fazer com que o polímero se adsorva de forma total em partículas individuais antes que ocorra a formação de pontes dificultando o processo de floculação. Além disso, a repulsão entre as cargas elétricas do polímero pode causar dispersão das

partículas. Por fim, a dosagem excessiva de polímero também pode resultar na formação de grandes flocos (superfloculação). Oliveira (2016) aponta que a formação de grandes flocos formados rapidamente pelo excesso de floculante, pode gerar a heterofloculação em que partículas de composições diferentes são floculadas, comprometendo a seletividade da floculação. Portanto, a concentração de floculante acima do ideal pode gerar além da heterofloculação uma situação de desfloculação, enquanto uma concentração abaixo do ideal pode afetar a formação de flocos (BRANDÃO, 2014 apud OLIVEIRA, 2016).

Os polímeros aniônicos são mais efetivos em relação aos polímeros catiônicos, isso porque as forças de atração entre as partículas negativas e o floculante de carga positiva são muito fortes, gerando uma adsorção que impede o mecanismo de conformação das moléculas do polímero para a solução (RODRIGUES, 2010).

O mecanismo de floculação por reversão localizada de carga ocorre quando um polímero (de peso molecular baixo ou médio) tem carga elétrica oposta à da superfície, revertendo a carga elétrica da superfície nas regiões da adsorção, resultando em uma superfície com distribuição heterogênea de cargas (BALTAR, 2010). A formação do floculo ocorre decorrente da colisão entre duas partículas com cargas opostas conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Representação do mecanismo de floculação por reversão de carga localizada



Fonte: HUNTER, 2001 apud RODRIGUES (2010, p. 33).

No caso dos flocos formados por este mecanismo existe o contato direto partícula-partícula. Os flocos apresentam crescimento lento, são pequenos, compactos, rígidos,

densos, sendo adequados as operações de filtração. A resistência do floco aumenta com a quantidade de pontos de contato da molécula com a superfície e com a intensidade de cada interação (Krishnan e Attia, 1988)

3.5 FLOCULAÇÃO SELETIVA

A floculação seletiva consiste no processo de agregação seletiva de partículas ultrafinas. Como aponta Attia (1992) a floculação seletiva ocorre devido a propriedades físico-químicas e baseia-se na adsorção preferencial de um floculante orgânico na superfície das partículas. Em alguns casos pode ser desejável o inverso da floculação seletiva, denominado dispersão seletiva. Após a formação do floco pode ser feita a separação dos mesmos por algumas técnicas dentre as quais destacam-se: flotação dos flocos também chamada de floco-flotação, sedimentação em espessadores, elutriação peneiramento e separação magnética.

Attia (1992) explica que a floculação seletiva pode ser alcançada de três maneiras distintas:

- a) Floculantes seletivos: utilizados individualmente ou em conjunto com algum dispersante geral. O controle de seletividade pode ser feito com o desenvolvimento de um polímero ou pela modulação química das interfaces, esta normalmente é feita controlando o potencial elétrico da superfície;
- b) Dispersantes seletivos: tem como principais funções a redução das taxas de agregação e sedimentação. Os mecanismos de dispersão são: controle do potencial elétrico induzindo a repulsão elétrica (este sendo o mais importante), redução da energia interfacial e solvatação da superfície pela adsorção de coloides hidrofílicos;
- c) Ativador seletivo: são usados em suspensões mistas juntamente com um floculante geral (não adsorvente).

Embora existam diferentes métodos para se obter a floculação seletiva, este processo possui algumas dificuldades de reprodutibilidade dos resultados de testes em sistemas naturais, que podem ser atribuídos a fatores como: aprisionamento de partículas de ganga no interior do floco, interferência de íons dissolvidos de outras espécies minerais e contaminação durante a etapa de moagem (BALTAR, 2010).

Outro fator destacado por Mathur et al. (2000) é o recobrimento superficial de partículas por impurezas e contaminantes. Esse fenômeno é observado principalmente após a moagem quando partículas menores de um mineral revestem a superfície de outro mineral de granulometria maior, tornando as superfícies indistinguíveis. Este problema é normalmente solucionado com a utilização de dispersantes ou introdução de um estágio para limpeza do floco por redispersão repetida e floculação.

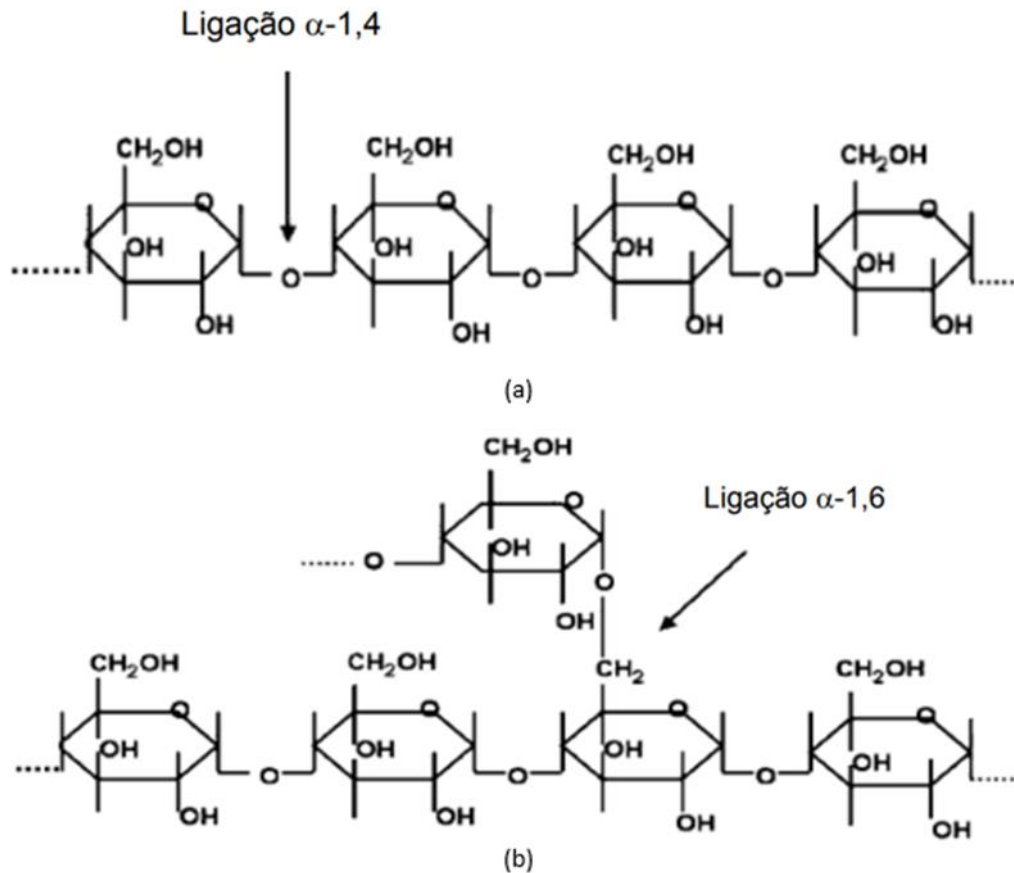
3.5.1 Reagentes utilizados na floculação seletiva

3.5.1.1 Floculantes

O amido é um dos agentes floculantes mais utilizados para floculação seletiva de minério de ferro. Quimicamente é um carboidrato altamente polimerizado constituído por unidades D-glicose expressa por (n) na formula geral $(C_6H_{10}O_5)_n$. São constituídos por duas frações denominadas de amilose e amilopectina (DENARDIN, 2009).

A amilose possui átomos de oxigênio nas posições 1 e 4 e amilopectina ligadas também por oxigênio nas posições 1,4 e 1,6 (COSTA, 1985). Segundo Denardin, (2009) o teor de amilose nos grânulos de amido varia entre 15% e 25% enquanto a amilopectina tem teor entre 75% a 85%, o autor ressalta que essa variação é advinda da fonte vegetal de origem. As fontes vegetais mais comuns utilizadas como reagentes para o tratamento de minério são o milho e a mandioca, tendo teores de amilose de 25-28% e 17% respectivamente (WEBER, 2009). As estruturas da amilose a amilopectina podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura da amilose (a) e estrutura da amilopectina (b)



Fonte: PEARSE (2005)

Turrer (2007) mostrou que a floculação tem maior influência da amilopectina se comparada a amilose, atribuindo esse fato ao maior peso molecular e sua não linearidade. Weissenborn (1996) estudou amidos naturais e concluiu que o sorgo ceroso produziu flocos com taxas de sedimentação mais altas que o amido de milho. Os maiores resultados podem ser atribuídos ao teor de quase 100% de amilopectina do sorgo em relação a 75% do amido de milho.

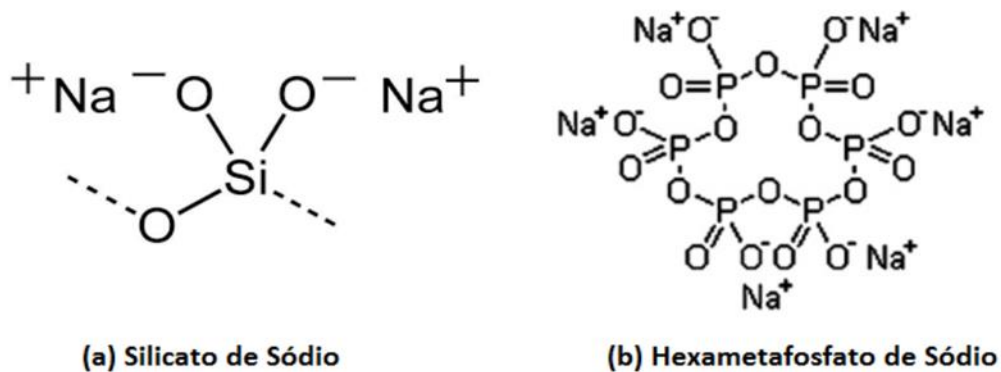
3.5.1.2 *Dispersantes*

Os principais desafios encontrados na floculação seletiva do minério de ferro composto majoritariamente pelos minerais hematita e quartzo é a heterocoagulação e contaminação cruzada que se trata do revestimento de um mineral na superfície do outro. Esses problemas podem ser minimizados pelo uso de dispersantes como sulfeto de sódio, silicato de sódio e polifosfatos (DRZYMALA et al, 2014).

Uma das maneiras de obter a dispersão da polpa é a presença de partículas carregadas negativamente, promovendo uma estabilização eletrostática do sistema. Mathur *et al.* (2000) aponta que o silicato de sódio (Figura 9 a) e o hexametáfosfato de sódio (Figura 9 b) são os dispersantes que melhor estabilizam polpas minerais. Ma (2011) ressalta que o dispersante mais utilizado no mundo para minério de ferro é o silicato de sódio.

Embora o silicato de sódio seja o dispersante mais utilizado para tratamento de minério de ferro, Ma (2011) aponta que seu uso é inadequado para a dispersão de caulinita (um dos principais minerais que contém Al_2O_3 no minério de ferro) nas condições de flotação de minério de ferro, sendo o hexametáfosfato de sódio um dispersando mais eficaz. O uso do silicato de sódio e de hexametáfosfato de sódio tem mais eficácia quando aplicado em meio alcalino, faixa de pH na qual os reagentes demonstraram forte afinidade com as superfícies de hematita (JORDAN *et al.* 2007).

Figura 9 - Fórmula química estrutural do silicato de sódio (a) e hexametáfosfato de sódio (b)



Fonte: ABREU (2018)

3.6 TRABALHOS SOBRE FLOCULAÇÃO SELETIVA

Ma (2012) estudou a influência da sequência da adição de dispersantes e floculantes na floculação seletiva de hematita. Os estudos foram realizados em pH 10,5 utilizando como dispersantes o hexametáfosfato de sódio (HMP) e o silicato de sódio (SS) e como floculante o amido de milho. Os resultados obtidos mostraram que o condicionamento de HMP e SS antes da adição do amido prejudicam a floculação de hematita. Este fato é atribuído à redução do número de sítios de adsorção para o

amido. Para o caso inverso em que o dispersante é adicionado após o pré-condicionamento com amido, a floculação de hematita não é afetada.

Panda *et al.* (2013) avaliou a seletividade do amido sobre a hematita na floculação seletiva dos minerais hematita e caulinita. O estudo foi realizado utilizando o amido como floculante e silicato de sódio e hexametáfosfato de sódio como dispersante. Os testes foram realizados na floculação individual dos minerais e com uma mistura sintética preparada na proporção 70:30 de (hematita e caulinita). Os experimentos foram realizados em um béquer de 1000ml com 5% de sólidos e pH 10,5. Para os ensaios realizados com um único mineral foi observado que o floculante foi seletivo para a hematita já que com o aumento da sua concentração houve um aumento da massa sedimentada em mais de 90% para a hematita enquanto o da caulinita foi inferior a 10%. Nos experimentos com a mistura sintética foi observado que nas dosagens de 0,8 g/kg de floculante e 4 g/kg de dispersante houve uma recuperação igual a 80,71% e 65,78% de teor de ferro. Os autores concluíram que a eficiência de separação é aumentada com o acréscimo da concentração de sólidos e ao elevar a dosagem de floculante houve uma redução na eficiência acarretada pela floculação da caulinita junto a hematita.

Kumar (2017) realizou estudos de recuperação de ferro de uma amostra de lama coletada na usina de processamento de minério de ferro de Kiriburu Jharkhand, localizado na Índia. Antes dos testes de floculação seletiva foram realizados estudos de sedimentação variando o pH e a densidade da polpa, e esses experimentos mostraram que a taxa de sedimentação diminuiu com o aumento da densidade da polpa e aumentou com o aumento do pH. Esses resultados foram atribuídos ao fato de que em valores mais altos de pH as partículas de ferro e ganga tendem a sedimentar. Dessa forma os experimentos de floculação seletiva foram realizados na faixa de transição que se encontrava no pH 10. Os experimentos de floculação seletiva utilizou os floculantes goma guar e poliacrilamida e como dispersante o hexametáfosfato de sódio na dosagem de 0,5 mg/g. O valor máximo de teor e recuperação foram iguais a 62,72% e 97,35%, respectivamente para a poliacrilamida na dosagem de 0,09 mg/g. Resultados semelhantes foram obtidos para a goma guar usando concentrações mais altas de 0,21 mg/g. Após o estágio de floculação foi feito a lavagem dos flocos em quatro estágios, aumentando o teor para 64,6% de Fe com

0,09 mg/g de poliacrilamida e 0,5 kg/t de hexametáfosfato de sódio, já para a goma guar, o teor foi elevado para 63,2% de Fe com 0,21 mg/g de floculante e 0,05 mg/g de dispersante.

Panda (2011) efetuou estudos de floculação seletiva de minérios *Banded Hematite Quartzite* (BHQ). Inicialmente foram realizados experimentos com quartzo e hematita pura, sendo todos coletados em minas de Odicha na Índia. Os experimentos foram realizados com 5% de sólidos como floculante foi utilizado o amido de batata e como dispersantes o hexametáfosfato de sódio, silicato de sódio, hidróxido de sódio e carbonato de sódio. Afim de se obter conhecimentos preliminares, foram realizados testes de sedimentação sem adição de nenhum reagente obtendo bons índices de dispersão na faixa de pH de 9-11, dessa forma, os seguintes experimentos foram realizados em pH 9. A concentração de amido foi investigada para o BHQ, apresentando 95% da hematita floculada com a dosagem de amido de 20 mg/L e 50 mg/L de hexametáfosfato de sódio (sendo ele o melhor dispersante), para essas concentrações observou-se a menor quantidade de quartzo sedimentada. Os experimentos realizados com minerais puros foram conduzidos na proporção 1:1 de hematita-quartzo, e chegaram a atingir teores de ferro de 64,5% com uma recuperação de 92%.

Os floculantes mais comuns utilizados para a floculação seletiva de minério de ferro são a poliacrilamida e o amido (advindo de diversas fontes vegetais). A Tabela 2 apresenta os parâmetros: tipo de floculante, concentração, tempo de agitação e velocidade comumente utilizados encontrados na literatura.

Tabela 2 - Parâmetros de floculante utilizado em diferentes estudos

Autor	Floculante	Concentração (mg/L)	Tempo de agitação (s)	Velocidade (r.p.m.)
Grossl (2009)	Amido de mandioca	3	-	-
Gomes (2021)	Amido de milho	10	-	-
Molina (2010)	Amido de batata	7,5	900	120
Bretas (2022)	Amido de milho	-	90	150
Bagster (1985)	Poliacrilamida	-	300	-
Kumar (2017)	Poliacrilamida e goma guar	-	60	-
Panda (2013)	Amido de trigo	-	-	50
Panda (2011)	Amido de batata	20	-	-
Weissenborn (1994)	Amido	50	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

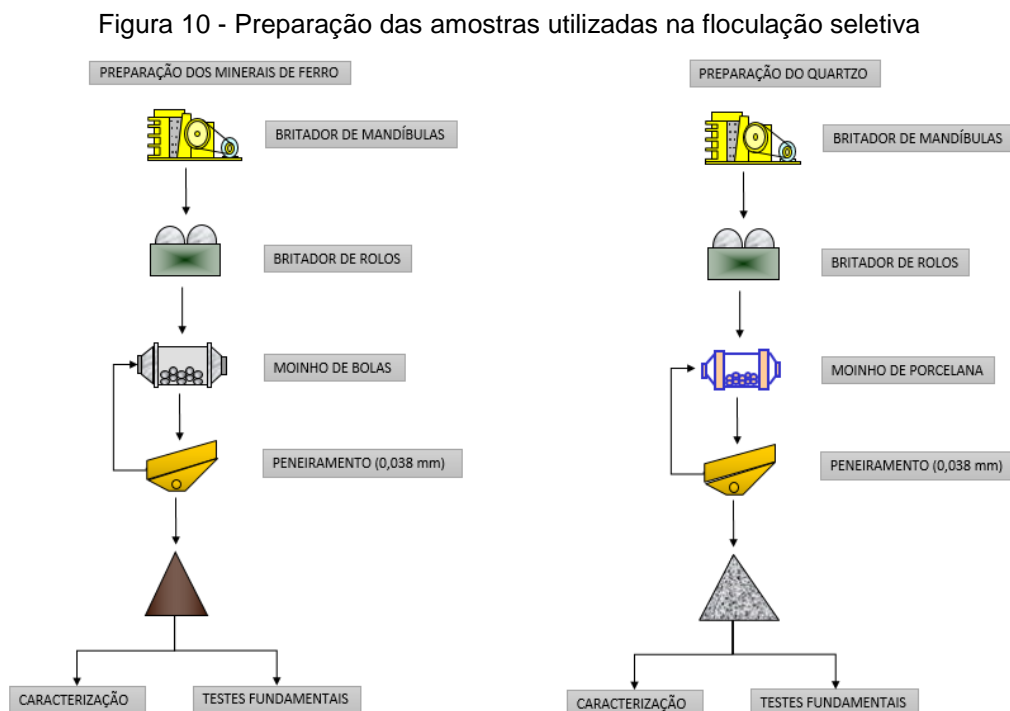
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e procedimentos experimentais utilizados para a realização dos testes de floculação seletiva com os minerais quartzo, goethita e hematita. Na segunda etapa da pesquisa foram realizados teste de sedimentação com as melhores condições encontradas nos experimentos de floculação.

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS MINERAIS

A amostra de quartzo foi coletada no leito de um rio nos arredores do município de Ouro Preto – MG e a amostra dos minerais portadores de ferro foi obtida em uma mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

A preparação das amostras foi realizada através das etapas de britagem (britador de mandíbulas e de rolos), moagem, peneiramento a úmido (100% da amostra passante na peneira de 0,038mm), homogeneização e quarteamento. Na etapa de moagem foi utilizado moinho de bolas para a amostra portadora dos minerais de ferro e moinho de porcelana para o quartzo. A Figura 10 mostra o fluxograma de preparação das amostras.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.2.1 Análise granulométrica

As análises granulométricas das amostras foram realizadas utilizando o granulômetro a laser CILAS 1064 pertencente ao Laboratório de Propriedades Interfaciais do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

4.2.2 Densidade relativa

A densidade relativa dos sólidos foi a medida por picnometria. Para tanto foi utilizado um picnômetro de vidro com volume igual a 100 ml. A vidraria consiste em um balão de vidro de base chata com uma rolha de vidro com um capilar.

Para a obtenção da densidade foram pesadas as massas descritas na Equação 5 (SAMPAIO e SILVA, 2007).

$$d_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (5)$$

Onde:

d_s : densidade dos sólidos;

A_1 : massa do picnômetro vazio

A_2 : massa do picnômetro + amostra

A_3 : massa do picnômetro + amostra + água

A_4 : massa do picnômetro + água

4.2.3 Caracterização mineralógica

Para identificação dos minerais constituintes nas amostras foram realizados ensaios de difratometria de raios – X (DRX), através do método do pó total. Os ensaios foram realizados no difratômetro de raios X da *PanAlytical* modelo *X'Pert3Powder* do Laboratório de Microscopia Óptica e Difração de Raios X do DEMIN/UFOP, equipado com tubo de cobre, operando na voltagem de 45 kV e corrente de 40 mA. Foi utilizado um filtro de níquel para obtenção da radiação K α Cu de comprimento de onda de 1,5406 Å. Os difratogramas foram coletados pelo *software Data Colector* num ângulo de varredura (2θ) que variou de 5° a 90° em um tempo de aproximadamente 14 minutos. Após a coleta dos difratogramas os dados foram tratados pelo *software HighScore Plus*.

4.2.4 Análise química

A análise química foi realizada através de fluorescência de raios X (WDXRF) em um equipamento da marca *Pananalytical*, modelo *Zetium* ou *Axios*, na Fundação Gorceix. As amostras foram pulverizadas em um moinho pulverizador até 95% das partículas estarem passantes na malha de 106 μ m e fundidas com tetraborato de lítio. A determinação da perda por calcinação (PPC/LOI) foi realizada segundo a norma ISSO 11536/2015.

4.3 REAGENTES UTILIZADOS

Na Tabela 3 estão apresentados os reagentes utilizados nos experimentos de floculação seletiva.

Tabela 3 - Reagentes utilizados para realização dos ensaios

Função	Reagente	Marca
Floculante	Amido de milho	Maizena
Dispersante	Hexametáfosfato de sódio	Fmaia
Moduladores de pH	Ácido clorídrico	Neon
	Hidróxido de sódio	Êxodo Científica

Fonte: Autoria própria (2023)

4.3.1 Amido milho

A solução “mãe” de amido de milho foi preparada na proporção 5:1 de hidróxido de sódio na concentração de 5000mg/L, conforme:

- a) Foram pesados 5g de amido de milho em um béquer de 250ml;
- b) Adicionaram-se 50mL de água destilada no béquer;;
- c) Adicionaram-se 1g de hidróxido de sódio (NaOH)
- d) A solução foi gelatinizada com o auxílio de um bastão de vidro até tornar-se transparente;
- e) Após a completa solubilização do reagente, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 1000mL, e seu volume foi completado com água destilada formando uma “solução mãe”, com concentração igual a 5000mg/L;
- f) Para a preparação de soluções de amido com concentrações menores, retirou-se da “solução mãe” o volume necessário para a nova diluição, transferiu-se a solução para um balão volumétrico de 1000ml completando o seu volume com água destilada, obtendo dessa forma a solução na concentração desejada.

4.3.2 Hexametáfosfato de sódio

- a) Pesaram-se 0,15g de hexametáfosfato de sódio em um béquer de 100ml;
- b) Adicionaram-se aproximadamente 100ml de água destilada ao béquer;
- c) Com o auxílio de um agitador magnético, homogeneizou-se o sistema até obtenção de uma solução homogênea;
- d) Transferiu-se a solução para um balão de 1000mL e seu volume completado com água destilada, formando uma solução com concentração igual a 150mg/L

4.3.3 Moduladores de pH

As soluções de ácido clorídrico foram preparadas nas concentrações de 1%, 5% e 10% v/v.

- a) Adicionaram-se 50mL de água destilada em três béqueres de 250mL;
- b) Na capela de exaustão mediu-se com o auxílio de uma pipeta, volumes iguais a 1; 5 e 10mL de ácido clorídrico (HCl – 37%) para as respectivas

concentrações e transferiu-se este volume para cada um dos béqueres contendo água destilada;

- c) Homogeneizou-se o sistema com o auxílio de um agitador magnético;
- d) As soluções foram transferidas para balões de 100mL e tiveram o volume completado com água destilada.

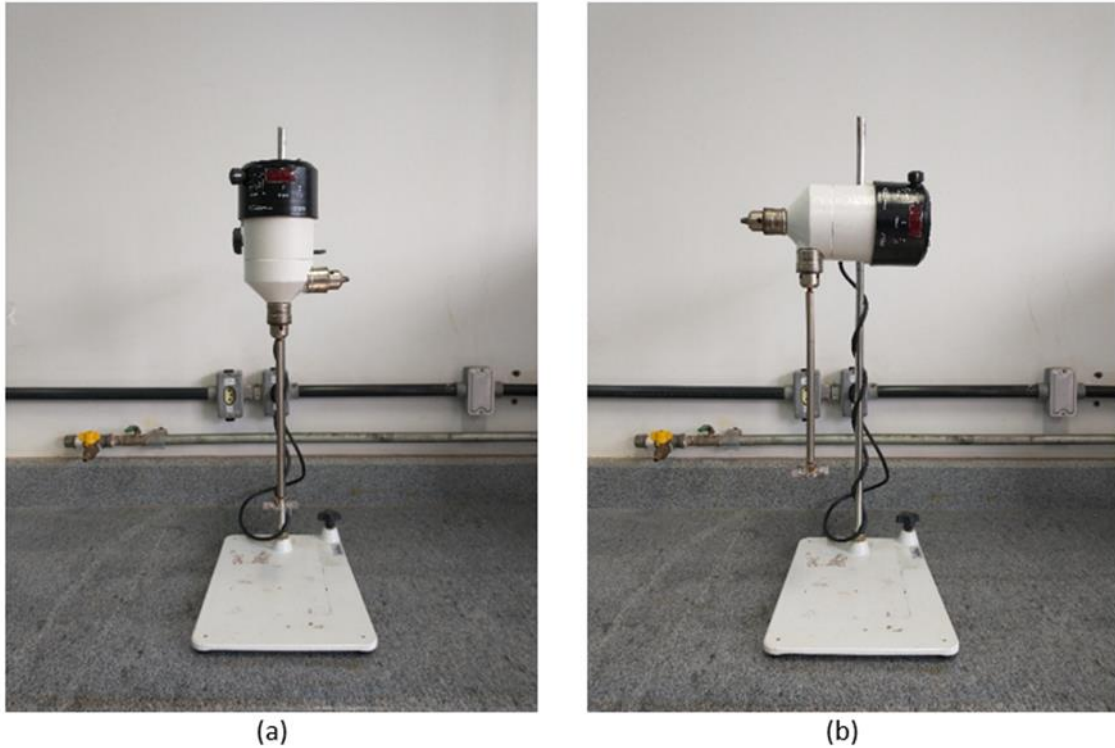
As soluções de hidróxido de sódio foram preparadas nas concentrações de 1%, 5% e 10% p/v.

- a) Em três béqueres de vidro, pesou-se as massas iguais a 1, 5 e 10g de hidróxido de sódio para as respectivas concentrações;
- b) Adicionaram-se 30mL de água destilada em cada béquer e com o auxílio de um agitador magnético homogeneizou-se cada uma das soluções até a completa solubilização;
- c) As soluções foram transferidas para balões de 100mL e tiveram o volume completado com água destilada.

4.4 EXPERIMENTOS DE FLOCULAÇÃO SELETIVA

Os testes de floculação seletiva foram realizados utilizando um agitador mecânico modelo 713D da marca Fisatom Equipamentos Científicos Ltda. A agitação foi feita por meio de uma hélice com diâmetro de 50 mm e 6 aletas (dimensão da aleta) gerando um fluxo radial. A hélice foi ligada a uma haste ($\varnothing 9 \times 220$ mm) e conectado ao motor de rotação regulável conforme apresentado na Figura 11. Na etapa de dispersão foi utilizado a regulagem com rotação entre 120 e 5000 rpm (Figura 11 a) e na etapa de floculação a regulagem do motor foi alterada para posição de alto torque com velocidade de rotação variando entre 10 e 280 rpm (Figura 11 b).

Figura 11 - Agitador mecânico na posição de alta rotação (a) e na posição de alto torque (b)



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 12 mostra o reator utilizado nos experimentos de floculação seletiva, que foi fabricado em cloreto de polivinila (PVC) com as seguintes dimensões: diâmetro de 75 mm e altura igual a 140 mm.

Figura 12 - Reator utilizado nos testes de floculação seletiva



Fonte: Autoria própria (2023)

O planejamento dos experimentos foi feito utilizando o método estatístico (DOE) por meio do *software* Minitab 18. Foi utilizado o método fatorial completo 2k com dois níveis e três fatores ($k=3$). Foram analisadas as variáveis concentração, tempo e velocidade de agitação, os valores foram definidos conforme o item 3.6 da revisão bibliográfica. Os níveis superiores e inferiores estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Níveis superiores e inferiores utilizados no planejamento fatorial

	Variáveis	
	Nível superior	Nível inferior
Concentração (mg/L)	50	5
Tempo (s)	300	120
Velocidade (rpm)	150	50

Fonte: Autoria própria (2023)

Todos os experimentos foram realizados em duplicata admitindo-se um desvio máximo de 5% entre os resultados. A Tabela 5 mostra a sequência aleatória gerada pelo software para realização dos experimentos.

Tabela 5 - Sequência dos experimentos de floculação seletiva

Testes	Concentração do amido de milho	Tempo	Velocidade
1	50	120	150
2	5	300	50
3	50	300	50
4	50	300	150
5	5	120	50
6	5	300	150
7	5	120	150
8	50	120	50

Fonte: Autoria própria (2023)

Os testes foram realizados de acordo com as seguintes etapas:

- a) Para cada condição analisada, foram adicionadas 10 g do mineral em análise no reator;

- b) Adicionaram-se 100 mL de água destilada com pH 10,5;
- c) Foram adicionados 50 ml da solução de dispersante de modo que a concentração final do sistema foi de 50 mg/L. O sistema foi condicionado durante 10 min a 2000 rpm.;
- d) Após esse tempo, foram adicionados 50 mL da solução de amido na concentração pré-estabelecida pelo teste. O tempo de floculação e a velocidade de agitação também variaram de acordo o experimento;
- e) Após o processo de floculação, os flocos foram transferidos para o cone de Imhoff. O sistema sedimentou-se por 10 min e em seguida aferiu-se o volume dos flocos.

4.5 CONE DE IMHOFF

O cone de Imhoff foi utilizado para medir a volume dos flocos formados em diferentes condições experimentais. Para realizar essa medida foi utilizado o cone de sedimentação o da fabricante Laborglass Brasil (Figura 13) com diâmetro superior de 120 mm, altura de 480 mm e capacidade de 1000 mL.

Figura 13 - Cone de Imhoff



Fonte: Autoria própria (2023)

A graduação do cone de Imhoff está apresentada na Tabela 6:

Tabela 6 - Graduação do cone de Imhoff

Volume (mL)	0 -2	2 - 10	10 - 40	40 - 100	100 – 500	500 - 1000
Subdivisão (mL)	0,1	0,5	1	2	400	500

Fonte: Autoria própria (2023)

4.6 EXPERIMENTOS DE SEDIMENTAÇÃO

A partir do maior volume sedimentado dos minerais de ferro, foram realizados experimentos de sedimentação, com o intuito de avaliar a diferença do volume sedimentado entre as amostras minerais com e sem floculação. Para estes ensaios foi utilizado o Cone de Imhoff, onde a polpa sedimentou-se por 24 horas. Em intervalos de tempo pré-definidos foi mensurado o volume sedimentado afim de construir as curvas de sedimentação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

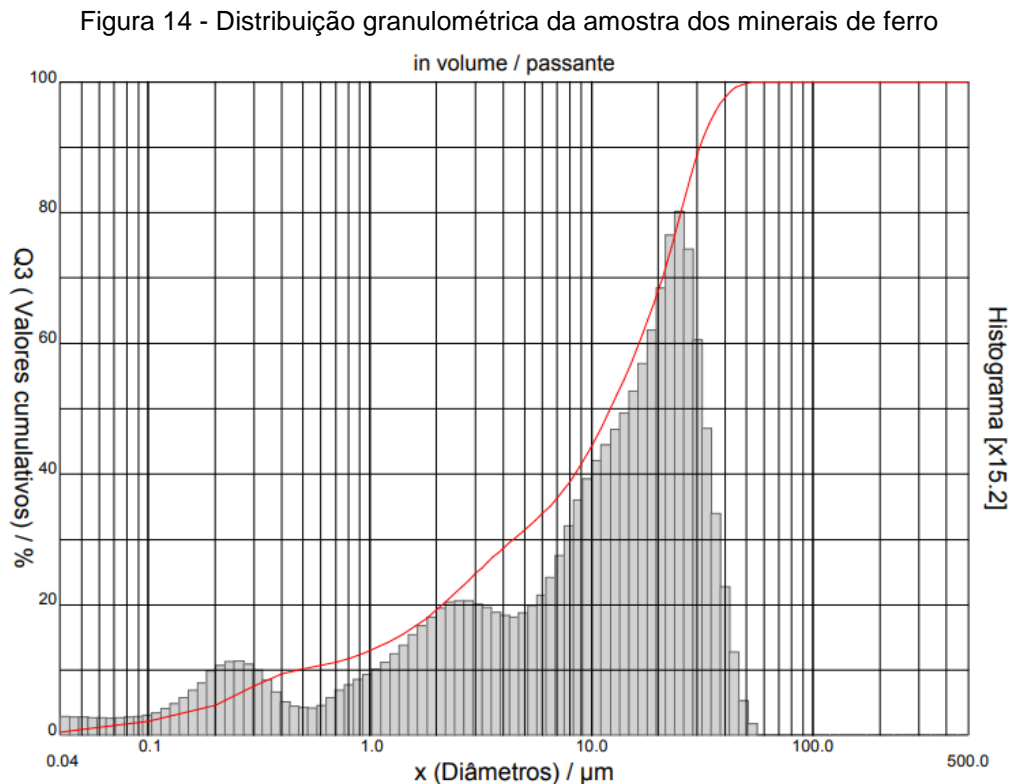
Neste capítulo estão apresentadas as análises dos resultados experimentais obtidos nas diferentes condições experimentais.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste item estão apresentados os resultados referentes a caracterização física e mineralógica das amostras utilizadas nesta pesquisa.

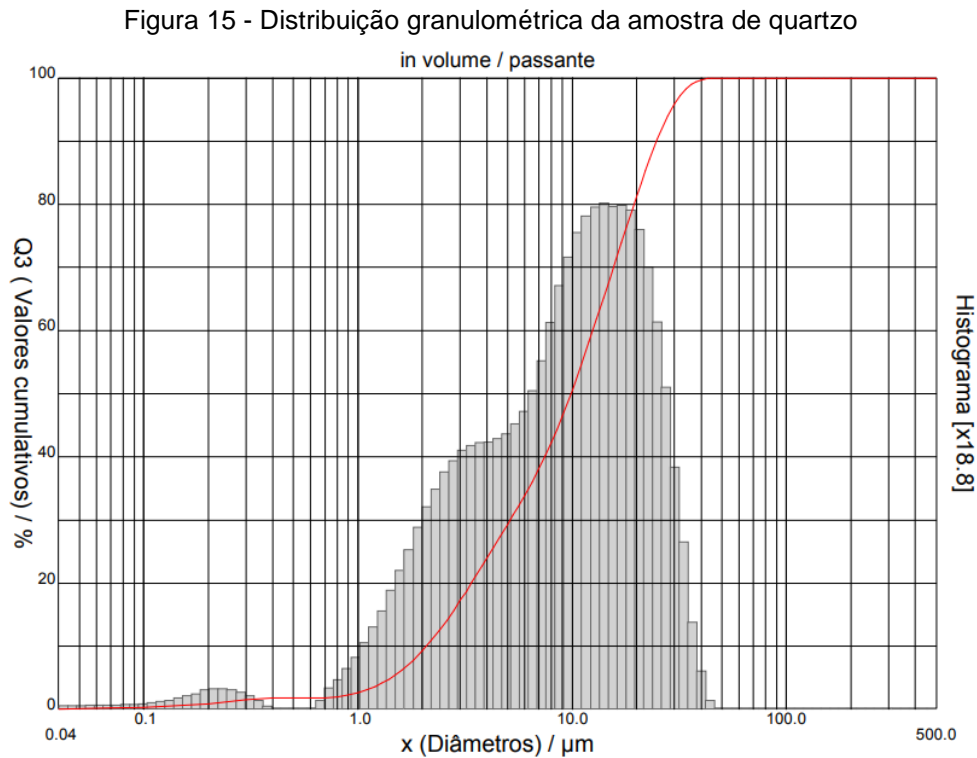
5.1.1 Análise granulométrica

O gráfico da Figura 14 apresenta a distribuição granulométrica da amostra de minerais de ferro após a cominuição. A amostra apresentou P_{50} igual a $12,17\mu\text{m}$ e P_{90} igual a $30,86\mu\text{m}$, com tamanho médio de $14,22\mu\text{m}$. O percentual de lamas (fração menor que $10\mu\text{m}$) foi igual a $44,27\%$.



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da Figura 15 ilustra a distribuição granulométrica da amostra de quartzo. A amostra apresentou um P_{50} igual a $9,86\mu\text{m}$ e P_{90} igual a $24,79\mu\text{m}$, com tamanho médio de $11,77\mu\text{m}$. O percentual de lamas foi de 50,56%.



Fonte: Autoria própria (2023)

5.1.2 Densidade

Os resultados obtidos foram considerados a partir da média de duas medições. Foram encontrados os valores de 4,52 e 2,63 para o minério de ferro e quartzo, respectivamente. O valor da densidade do quartzo ficou próximo do valor identificado por Dana, (1981) de $2,65\text{g}/\text{cm}^3$. O valor da densidade da amostra de minerais de ferro ficou entre as densidades da goethita ($4,37\text{g}/\text{cm}^3$) e da hematita ($5,24\text{g}/\text{cm}^3$), os quais são os principais constituintes da amostra (REZENDE; PERES, 2011; TOGASHI, 2021).

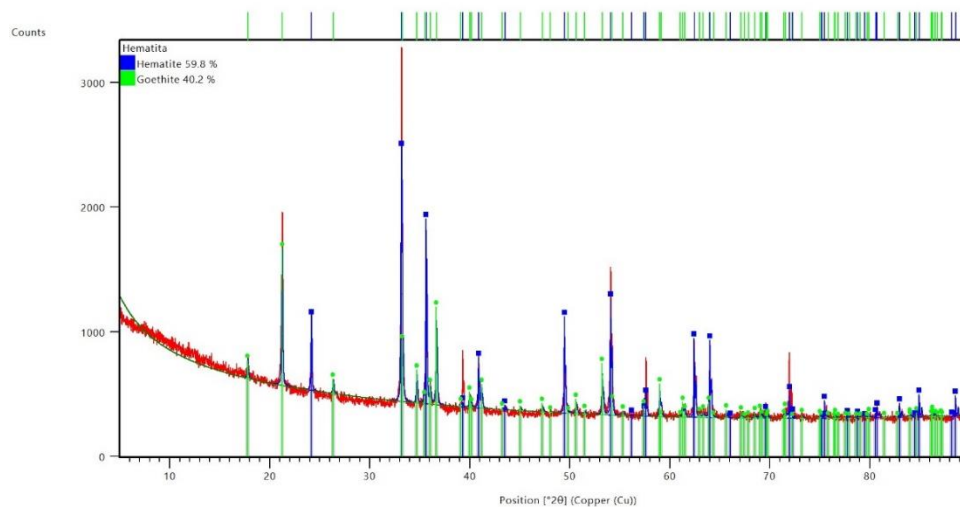
5.1.3 Caracterização mineralógica

Os resultados da difração de raios-X foram analisados comparando os valores das distancias interplanares e das intensidades dos picos com as amostras de referência,

foi utilizado o *software HighScore Plus* e seu banco de dados para analisar os valores obtidos, através do *software* foi realizado também uma análise semi-quantitativa das fases minerais presentes.

A Figura 16 apresenta o difratogramas de raios-X da amostra portadora dos minerais de ferro utilizadas para o estudo. Os minerais presentes na amostra foram hematita e goethita, nas porcentagens estimadas de 59,8% e 40,2%, respectivamente.

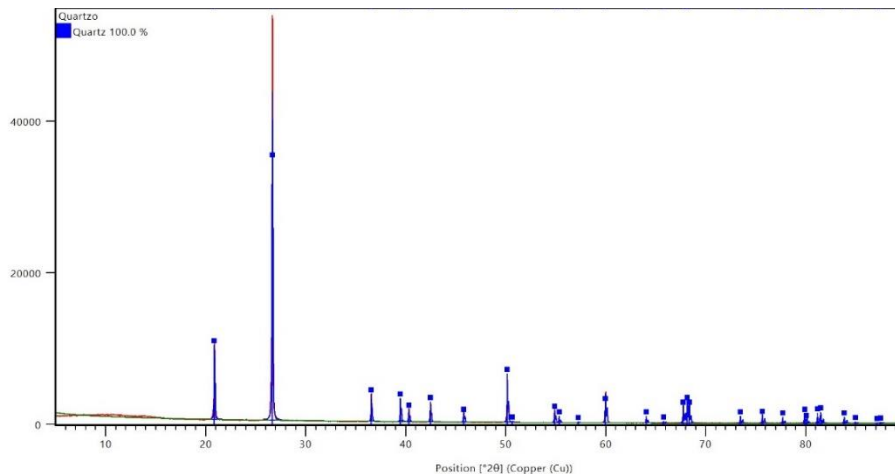
Figura 16 - Difratogramas de raios-X da amostra de minerais de ferro



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 17 apresenta o difratogramas de raios-X da amostra de quartzo. Os resultados permitiram confirmar o grau de pureza da amostra, possuindo 100% de quartzo em sua composição.

Figura 17 - Difratogramas de raios-X da amostra de quartzo



Fonte: Autoria própria (2023)

5.1.4 Análise química

A Tabela 7 mostra os teores dos elementos químicos, e por meio deles pode-se observar um teor de ferro de 65,11%, comprovando a pureza da amostra. Tal teor é caracterizado pela presença de hematita e goethita.

Tabela 7 – Teores dos elementos químicos presentes na amostra de minerais de ferro

Amostra	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	PPC
%	65,11	1,8	0,31	0,21	0,107	0,08	0,14	<0,01	0,04	0,02	0,05	3,93

Fonte: Aatoria própria (2023)

5.2 EXPERIMENTOS DE FLOCULAÇÃO

Os ensaios de floculação seletiva foram avaliados em termos do volume sedimentado dos flocos dos minerais de ferro e quartzo medidos no Cone de Imhoff após 10 minutos de sedimentação. A influência das variáveis concentração de amido (A), tempo de floculação (B) e velocidade de agitação (C) foram analisadas através do *software* MINITAB®18 e os resultados estão apresentados na Tabela 8. O volume sedimentado dos minerais de ferro e quartzo na ausência de floculante foram iguais a 5,5 mL e 2,3 mL, respectivamente.

Tabela 8 - Volume sedimentado dos flocos dos minerais de ferro e quartzo medidos no cone de Imhoff

Teste	Concentração do amido de milho (mg/L)	Tempo (s)	Velocidade (rpm)	Volume sedimentado (mL/L)	
				Minerais de ferro	Quartzo
1	50	120	150	11	2,6
2	5	300	50	6,75	2,4
3	50	300	50	7,25	2,4
4	50	300	150	11	2,6
5	5	120	50	7	2,4
6	5	300	150	8	2,5
7	5	120	150	8	2,6
8	50	120	50	10,5	2,6

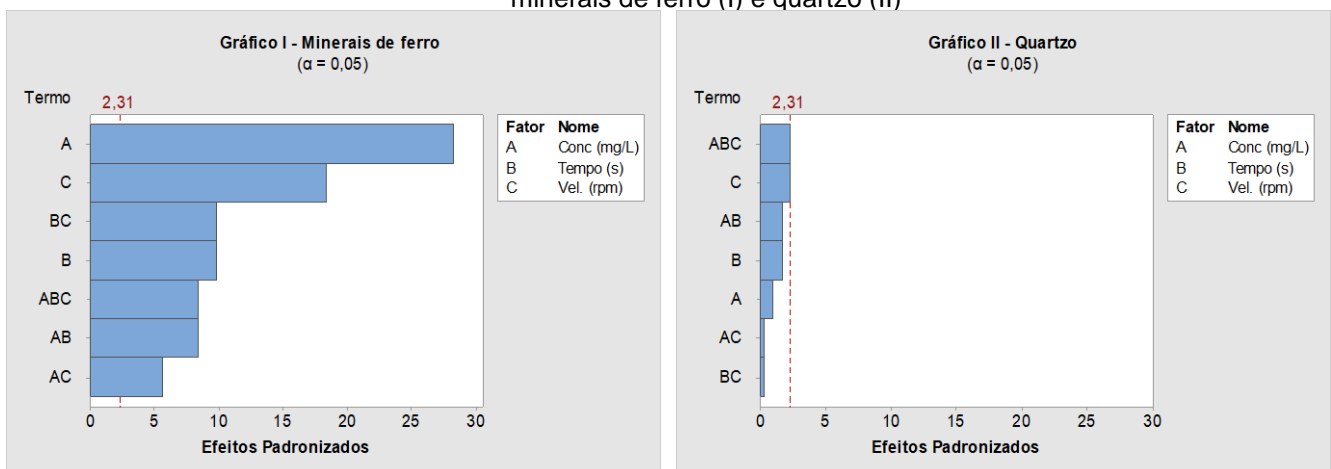
Fonte: Aatoria própria (2023)

Os gráficos de Pareto apresentados na Figura 18 apresentam os valores absolutos e a importância dos efeitos padronizados das variáveis analisadas. O gráfico também representa graficamente, a partir da linha de referência, os efeitos estatisticamente significativos com base em um intervalo de confiança de 95%. Já a Figura 19 apresenta os efeitos principais das variáveis no volume sedimentado.

Analisando os resultados pôde-se observar que o maior efeito principal para a floculação dos minerais de ferro, objetivo principal desta pesquisa, foi concentração de amido (A) seguido da velocidade de agitação do sistema (C). Entretanto, as barras que representam o efeito principal B (tempo de floculação) bem como as interações BC, ABC, AB e AC cruzam a linha de referência que está em 2,31 e também são estatisticamente significativos ao nível ($\alpha=0,05$) ainda que em menor magnitude.

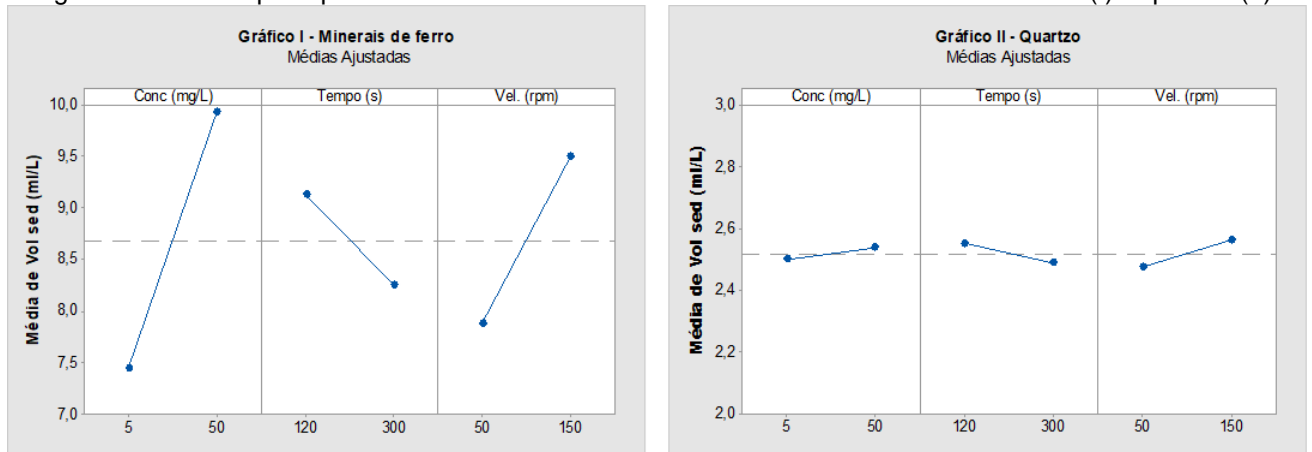
Para a floculação do quartzo, apenas o efeito principal C (velocidade de agitação) e a interação ABC foram estatisticamente significativos.

Figura 18 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados das variáveis sobre o volume sedimentado dos minerais de ferro (I) e quartzo (II)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 19 - Efeitos principais das variáveis no volume sedimentado dos minerais de ferro (I) e quartzo (II)



Fonte: A autoria própria (2023)

As análises dos resultados comprovam que a floculação dos minerais de ferro utilizando o amido de milho como floculante é fortemente dependente da concentração deste reagente. O aumento da concentração de floculante, resultou no aumento do volume sedimentado para todos ensaios realizados em diferentes condições experimentais. A maior diferença do volume dos flocos sedimentados (50%) observada com o aumento da dosagem ocorreu nos experimentos realizados com velocidade de agitação igual a 50 rpm e tempo de floculação igual a 120s. Analisando a diferença entre o volume do sistema sem adição de floculante e dos sistemas com adição de amido, observou-se para dosagem de 50 mg/L, um aumento ainda maior (100%) que passou de 5,5 mL (sem reagente) para 11 mL para a condição: velocidade de rotação igual a 150 rpm independente do tempo de floculação.

O aumento da velocidade de agitação também contribuiu para o aumento do volume dos flocos sedimentados em todas as condições analisadas. A maior diferença entre o volume dos sistemas floculados aumentando a velocidade de rotação foi igual a (55,17%) para os experimentos realizados com dosagem de amido igual a 50 mg/L e tempo de floculação 300 segundos.

O tempo de floculação apresentou comportamento contrário ao das outras variáveis analisadas, uma vez que o aumento do tempo de floculação não alterou ou diminuiu o volume dos flocos dependendo da condição analisada. A maior redução no volume dos flocos sedimentados (30,95%) com o aumento do tempo foi observada para os experimentos realizados com dosagem de floculante igual a 50 mg/L e velocidade de

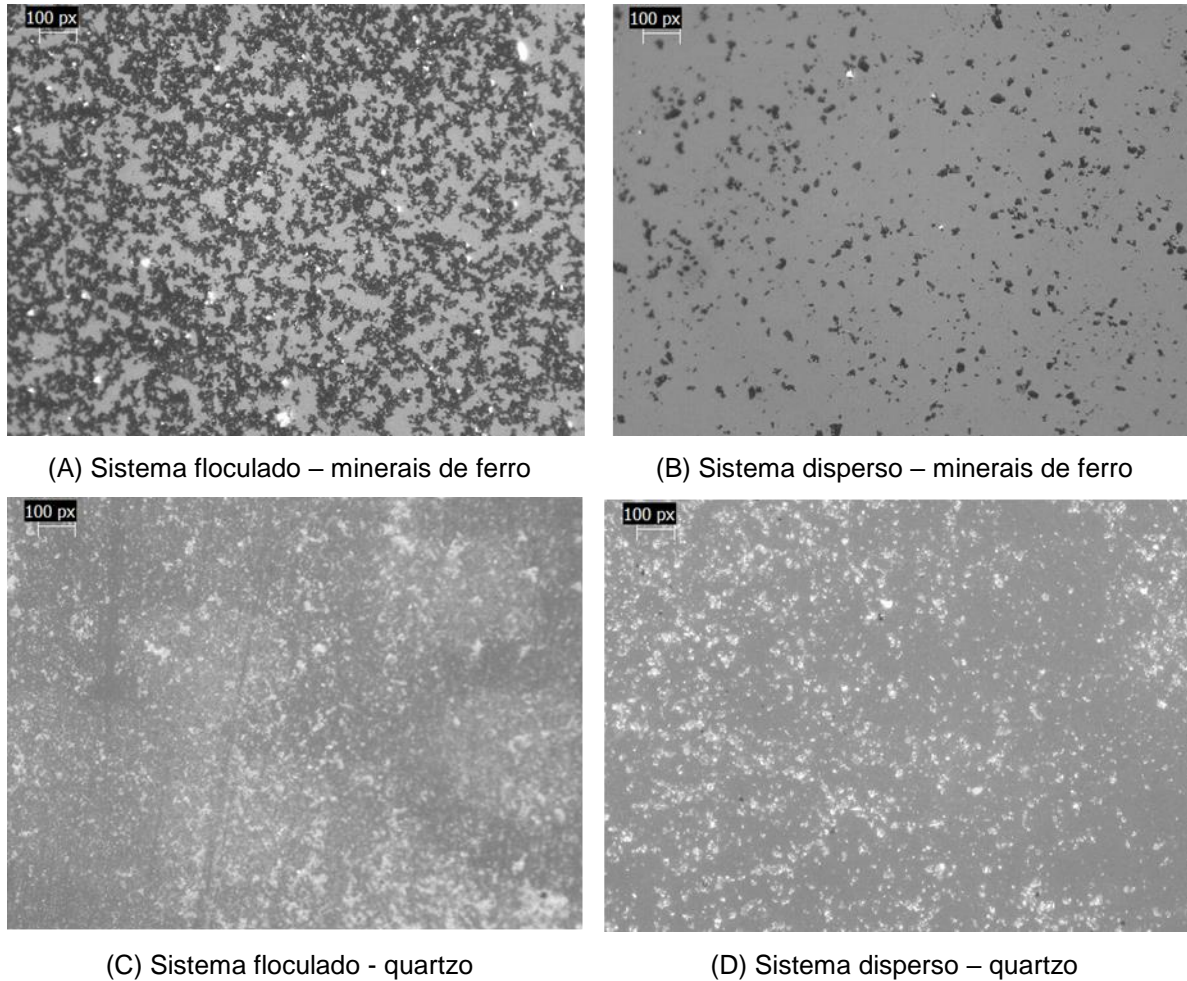
rotação igual a 50 rpm. A explicação deste fenômeno foi realizada por Gregory (1988), que salienta que a floculação pode acontecer de forma muito rápida e os flocos atingirem um tamanho limite, dessa forma, com o aumento do tempo sob agitação tem-se uma maior probabilidade de quebra do floco, que após quebrado podem não se formar facilmente.

Para o quartzo, a floculação foi insignificante sendo que para todas as condições analisadas o volume de material sedimentado ficou muito próximo ao volume medido na ausência de flocoante. O aumento das variáveis velocidade de agitação e tempo de agitação do nível inferior para o nível superior manteve o volume de material sedimentado inalterado ou resultou em um aumento de pequena magnitude. Já o aumento tempo de floculação ou não alterou ou diminuiu o volume dos flocos sedimentados.

Por fim, a condição para se obter a floculação de forma seletiva, agregando os minerais de ferro e mantendo disperso o quartzo, foram concentração de flocoante (50mg/L), tempo de agitação (120s) e velocidade de agitação (150rpm). Esta foi a condição que apresentou o maior aumento do volume sedimentado dos minerais de ferro em relação ao sistema disperso. Para o quartzo, nesta condição, a diferença entre o sistema flocoado e disperso foi pequena passando de 2,3 mL/L (sem flocoante) para 2,6 mL/L (com flocoante) significando que as partículas deste mineral continuam dispersas.

A Figura 20 apresenta as fotomicrografias (aumento 35x) obtidas com o auxílio do microscópio Leica EZ4W dos sistemas flocoados e dispersos dos minerais de ferro e do quartzo. Os flocos de ambos minerais foram formados com concentração de amido igual a 50 mg/L, velocidade de agitação igual a 150 rpm e tempo de floculação igual a 120s. Foi possível observar, a partir da análise das imagens, a formação dos flocos dos minerais de ferro, que não foi tão evidente para o quartzo.

Figura 20 – Fotomicrografias dos sistemas floculados e dispersos

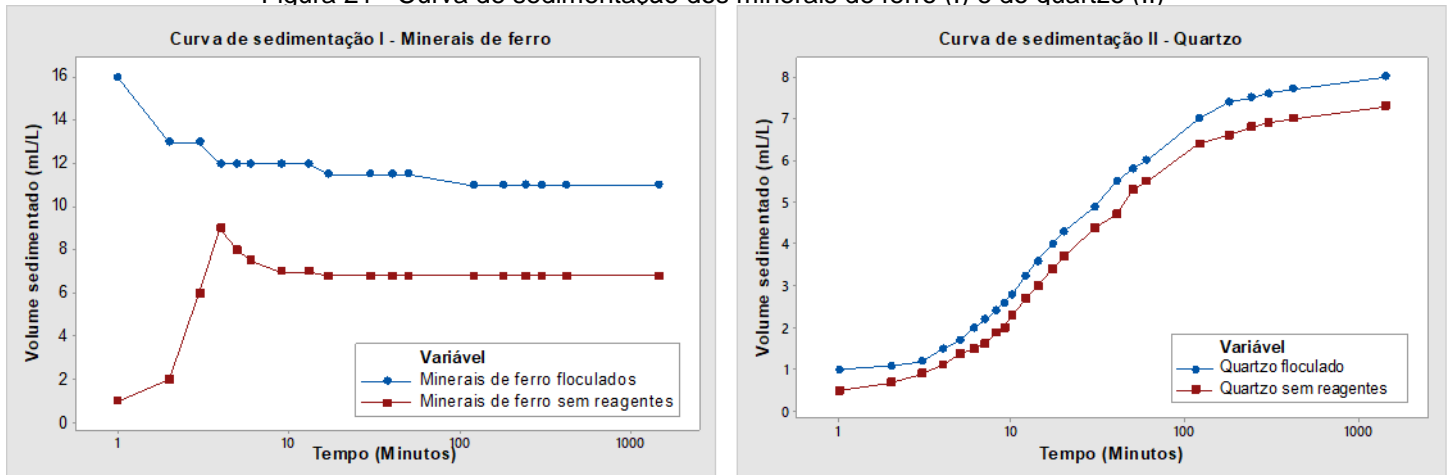


Fonte: Autoria própria (2023)

5.3 ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO

A Figura 21 apresenta as curvas de sedimentação dos minerais de ferro e do quartzo na ausência e na presença do floculante. Os ensaios com floculante foram realizados com concentração de amido igual a 50 mg/L, velocidade de agitação igual a 150 rpm e tempo de floculação igual a 120s.

Figura 21 - Curva de sedimentação dos minerais de ferro (I) e do quartzo (II)



Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando as curvas de sedimentação, foi possível observar um aumento no volume do material sedimentado ao longo do tempo com o uso de flocculante em relação aos sistemas dispersos para ambas amostras. Entretanto, após 1440 minutos (24h) de sedimentação, para os minerais de ferro o aumento no volume sedimentado de (61,8%) foi muito superior ao do quartzo (9,6%), indicando a seletividade do amido de milho na floculação dos minerais de ferro em relação ao quartzo.

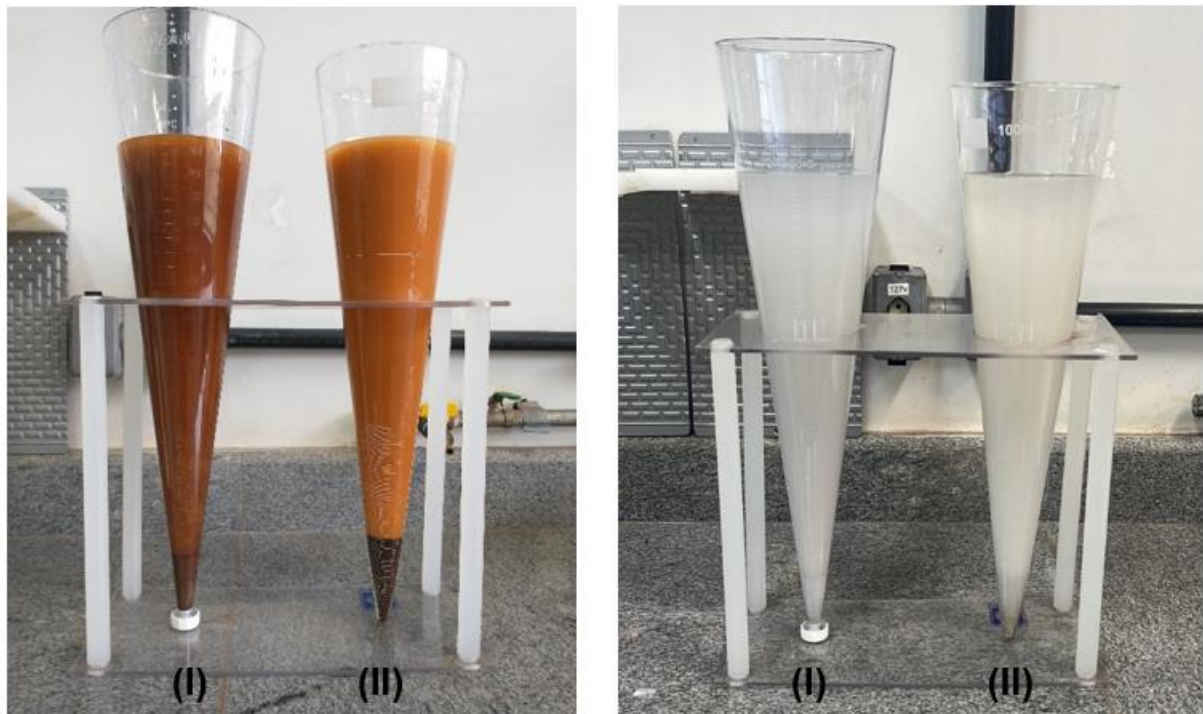
Analisando a curva de sedimentação (sistema floculado) dos minerais de ferro observou-se uma elevada taxa de sedimentação nos minutos iniciais da decantação, seguido por uma diminuição gradual da taxa de sedimentação referente ao período de compactação dos flocos e por último a estabilização do volume sedimentado em 11mL a partir de 55 minutos. Já a curva de sedimentação dos minerais de ferro na ausência do flocculante (sistema disperso) apresentou comportamento distinto, sendo que o volume sedimentado aumentou durante os 8 primeiros minutos da sedimentação e estabilizou-se em 6,8 mL após 17 minutos, comprovando a importância da floculação para aumentar a taxa de sedimentação de partículas ultrafinas dos minerais de ferro.

Para o quartzo, independente da presença ou ausência do flocculante, observou-se que as curvas de sedimentação apresentaram comportamentos análogos, em que o volume de material sedimentado aumentou com o tempo, estabilizando-se a partir de aproximadamente 180 minutos, para ambas as curvas. A baixa velocidade de

sedimentação do quartzo indica a baixa floculação do sistema utilizando amido como floculante.

As imagens da Figura 22 mostram os experimentos de sedimentação dos (A) minerais de ferro e (B) do quartzo. O aspecto do material sedimentado no cone (II) do sistema A, é característico de um sistema floculado em que é favorecido a sedimentação das partículas. Esse comportamento, ocorre de forma menos nítida no cone (II) formado pelo quartzo.

Figura 22 - Experimentos de sedimentação dos sistemas dispersos (I) e floculados (II)



(A) Minerais de ferro

(B) Quartzo

Fonte: Autoria própria (2023)

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível entender o impacto das variáveis estudadas na seletividade da floculação de sistemas individuais formados por hematita-goethita e quartzo, prevendo as melhores condições para a floculação de finos de minerais de ferro.

Como era esperado, comprovou-se a floculação dos minerais de ferro utilizando amido de milho e observou-se que a floculação desses minerais é fortemente dependente da concentração do flocculante e da velocidade de agitação. Neste trabalho, o aumento dessas variáveis para o nível superior testado, resultou no aumento do volume sedimentado. Já o aumento do tempo de floculação não alterou ou diminuiu o volume dos flocos dependendo da condição analisada.

Para o quartzo, a floculação foi insignificante sendo que para todas as condições analisadas o volume de material sedimentado ficou muito próximo ao volume medido na ausência de flocculante.

Analisando as curvas de sedimentação, foi possível observar um aumento no volume do material sedimentado, dos sistemas flocculados em relação aos sistemas dispersos para ambos minerais. Esse aumento foi maior para os minerais de ferro (61,8 %) do que para o quartzo (9,6%), indicando a seletividade do amido de milho na floculação dos minerais de ferro.

A curva de sedimentação dos minerais de ferro dos sistemas flocculados apresentou comportamento distinto da curva de sedimentação do sistema disperso, comprovando o fenômeno da floculação destes minerais. Para o quartzo, observou-se que as curvas de sedimentação dos sistemas flocculados e dispersos apresentaram comportamentos análogos, em que o volume de material sedimentado aumentou com o tempo. A baixa velocidade de sedimentação do quartzo indicou a baixa floculação do sistema utilizando amido como flocculante.

A floculação de forma seletiva, agregando os minerais de ferro e mantendo disperso o quartzo, foi obtida nos ensaios realizados com concentração de flocculante (50mg/L),

tempo de agitação (120s) e velocidade de agitação (150rpm). Nesta condição houve aumento significativo de volume sedimentado dos minerais de ferro o que não foi observado para o quartzo.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Francisco de Paula Vitor Fonseca. **Estudos de dispersão/floculação seletiva de lama de minério de ferro**. 2018. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- ATTIA, Y. A. Chapter 9 - Flocculation. Em: LASKOWSKI, J. S.; RALSTON, J. (Eds.). **Developments in Mineral Processing**. Colloid Chemistry in Mineral Processing. [s.l.] Elsevier, v. 12p. 277–308,1992.
- BAGSTER, D. F.; MCILVENNY, J. D. Studies in the selective flocculation of hematite from gangue using high molecular weight polymers. Part 1: Chemical factors. **International Journal of Mineral Processing**, v. 14, n. 1, p. 1–20, 1985.
- BALTAR, C. A. M. Floculação, Cap. 12. In: Da Luz, A. B.; Sampaio, J.A.; França, S.C.A. **Tratamento de Minérios** – 4ª Edição. Rio de Janeiro CETEM/MCT, p. 497-523, 2004
- BALTAR, C. A. M. Processos de Agragação, Cap. 13. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de minérios**. CETEM/MCT, 2010.
- BALTAR, C. A. M. **Flotação: em nova abordagem**. Recife: Ed. UFPE, p. 537, 2021.
- BRETAS, P. L.; RODRIGUES, O. M. S.; LUZ, J. A. M. DA. Selective flocculation and floc-flotation of iron bearing mineral slimes. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e45011528289, 2022.
- COELHO, E., M. Floculação seletiva: Princípios Básicos e Aplicações. **II Encontro Nacional de Tratamento de Minérios**, COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro, 1974.

COSTA, Tania Maria Haas. **Estudo de floculação seletiva em um sistema amilopectina hematita/quartzo**. 1985. 135f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

DANA, J. D. (1981). **Manual de Mineralogia**. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1981.

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

DRZYMALA, J.; FUERSTENAU, D. W. Selective flocculation of hematite in quartz–hematite–ferric ion–polyacrylic acid system. Part 2. Effect of grinding and a hydrofluoric treatment on selectivity of flocculation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 129, p. 1–5, 2014.

ERIKSSON, Leif; ALM, Barbro; ALDÉN, Liselotte. Relations between flocculation mechanisms, floc structures and separation properties. **Flocculation and Dewatering**, p. 179-193, 1989

GOMES, C. E. P. **Remoção de partículas de suspensões de caulim e de águas brutas por coagulação-floculação com cloreto férrico e amido gelatinizado**. 2021. 94f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

GREGORY, J. Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. **Colloids and Surfaces**, Proceedings of an International Conference. v. 31, p. 231–253, 1988.

GROSSL, K. EMPREGO DO AMIDO DE MANDIOCA COMO AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DE ÁGUAS PARA ABASTECIMENTO. 2009.

JORDAN, N. et al. Sorption of silicates on goethite, hematite, and magnetite: Experiments and modelling. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 312, n. 2, p. 224–229, 15 ago. 2007.

JUNIOR, Miguel Jafelicci; VARANDA, Laudemir Carlos. O mundo dos colóides. **Química nova na escola**, v. 9, p. 9-13, 1999.

KIRWAN, L. J. **An investigation of polyacrylate adsorption onto hematite**. 2002. Tese (Doutorado). Curtin University of Technology, Perth, 2002.

KITCHENER, J. A. Principles of action of polymeric flocculants. **British Polymer Journal**, v. 4, n. 3, p. 217-229, 1972.

KITCHENER, J. A. "**Minerals and Surfaces**". In: Laskowski, J.S., Ralston, J. (eds.), Colloid Chemistry in Mineral Processing, chapter 1, Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science Publishers, 1992

KRISHNAN, Santhana V.; ATTIA, Yosry A. Polymeric flocculants. In: **Reagents in Mineral Technology**. Routledge, p. 485-518, 2018.

KUMAR, R.; MANDRE, N. R. Recovery of iron from iron ore slimes by selective flocculation. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 117, n. 4, p. 397-400, 2017.

LEITE, Aline da Mata Chiacchio. **Amido natural e modificado como floculante de lama de minério de ferro**. 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019

LI, Shulei; MA, Xiaomin; WANG, Junchao; XING, Yaowen; GUI, Xiahui; CAO, Yijun. Effect of polyethylene oxide on flotation of molybdenite fines. **Minerals Engineering**, v. 146, n. 106146, 2020.

LI, Mingyang; XIANG, Yahui; CHEN; Tiejun; GAO; Xiangpeng, LIU, Qi. Separation of ultra-fine hematite and quartz particles using asynchronous flocculation flotation. **Minerals Engineering**, v. 164, n. 106817, 2021.

LOTTERMANN, M. R. **O Efeito do Tamanho de Bolha na Flotação de Partículas de Quartzo**. 2014.

LUCKHAM, P. F.; ROSSI, S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. **Advances in colloid and interface science**, v. 82, n. 1-3, p. 43-92, 1999.

MAGDASSI, S.; RODEL, B. Flocculation of montmorillonite dispersions based on surfactant-polymer interactions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, vol. 119, pp. 51-56, 1996.

MATHUR, S.; SINGH, P.; MOUDGIL, B. M. Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58, n. 1-4, p. 201-222, 2000.

Ma, M. **The dispersion of kaolinite**. In: Iron Ore 2011; 11-13 July 2011; Perth, WA, Australia. Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM); 471-474, 2011. csiro:EP106052. <http://hdl.handle.net/102.100.100/103708?index=1>

MA, M. The significance of dosing sequence in the flocculation of hematite. **Chemical engineering science**, v. 73, p. 51-54, 2012.

MA, X. The Dispersion of Kaolinite," **Proceeding of the Iron Ore Conference**, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, Austrália, pp. 471-474, 2011.

MARTINS, J.; BORGES, A. A. O aproveitamento de lamas de minério de ferro por flotação colunar. **XIX ENTMME**, p. 211-215, 2002.

MENDES, Carlos Gomes da Neve. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. 1990. 244f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 1990. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-20092019-165430/>. Acesso em: 16 nov. 2022.

MOLINA, T.; SANTOS, H. R. Caracterização e tratamento de água de lavagem de filtros de ETA, com o uso de polímeros sintéticos e amido de batata. **Revista de**

Engenharia e Tecnologia, v. 2, p. 28-44, 2010. Disponível em: <https://revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/11312#:~:text=Conclui-se%20que%20a%20%C3%A1gua,para%20o%20processo%20da%20ETA>. Acesso em: 29 mar. 2023.

OLIVEIRA, M. F. M. DE. **Poliacrilamidas na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2016. 59f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

PANDA, L. et al. Selective flocculation of banded hematite quartzite (BHQ) ores. **The Open Mineral Processing Journal**, v. 4, n. 1, p. 45-51, 2011.

PANDA, Lopamudra et al. Performance evaluation for selectivity of the flocculant on hematite in selective flocculation. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, v. 20, n. 12, p. 1123-1129, 2013.

PEARSE, M. J. An overview of the use of chemical reagents in mineral processing. **Minerals Engineering**, Reagents '04. v. 18, n. 2, p. 139–149, 2005.

PEASE, J. D.; CURRY, D. C.; YOUNG, M. F. Designing flotation circuits for high fines recovery. **Minerals Engineering**, Selected papers from the Centenary of Flotation Symposium, 5–9 June 2005, Brisbane, Australia. v. 19, n. 6, p. 831–840, 2006.

PERES, A. E. C. et al. Métodos de Concentração. Em: **Introdução ao tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 105–139, 2007.

REZENDE, A. J. C.; PERES, A. E. C. Sedimentação de concentrados de minérios de ferro com diferentes percentuais de perda por calcinação. **XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, p. 16-19, 2011.

ROCHA, J. M. DE P. **Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração SA-Minas Gerais**, 2008. 346f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

RODRIGUES, Cristiane Oliveira. **Mecanismos de floculação com polímeros hidrossolúveis, geração de flocos aerados, floculação em núcleos de bolhas floculantes e aplicações na separação de partículas modelos por flotação**. 2010. 237f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ROSE, G.R., JOHN, M.R., Flocculation. In: MARKS, BIKALES. OVERBERGER. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2ed., John Willey&Sons, 1985.**

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. G. Determinação das densidades de sólidos e de polpas. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, cap. 2, p. 37-51. 2007.

SANTOS, E. P. DOS. **Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da Mina do Pico/MG por flotação em coluna**. 2010. 114f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOMASUNDARAN, P. **Fine particles processing aggregation**. In. Proceedings of the International Symposium on Fine Particle Processing. Las Vegas, 1980.

SHAW, D.J. **Introdução à química de colóides e de superfícies**. Trad. De J.H. Maar. São Paulo: Edgard Blucher/Edusp, 1975

TESTA, F. G. **Avanços na flotação de finos de minério com condicionamento em alta intensidade**. 2008. 82f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TOGASHI, M. M. **Efeito do tamanho e distribuição de tamanho inicial das partículas da hematita, na cinética de sinterização assistida por micro-ondas**. 2021. 223f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

TURRER, H. D. G. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro**. 2007. 171f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

WEBER, F. H.; COLLARES-QUEIROZ, Fernanda Paula; CHANG, Yoon Kil. Caracterização físico-química, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. **Food Science and Technology**, v. 29, p. 748-753, 2009.

WEISSENBORN, P. K.; WARREN, L. J.; DUNN, J. G. Optimisation of selective flocculation of ultrafine iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, v. 42, n. 3-4, p. 191-213, 1994.

WEISSENBORN, P. K. Behaviour of amylopectin and amylose components of starch in the selective flocculation of ultrafine iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, n. 3-4, p. 197-211, 1996.

YOON, Se-Young; DENG, Yulin. Flocculation and reflocculation of clay suspension by different polymer systems under turbulent conditions. **Journal of colloid and interface science**, v. 278, n. 1, p. 139-145, 2004.

YUAN, Shuai; LIU, Xiao; GAO, Peng; HAN, Yuenxin 2020. A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud. **Journal of Hazardous Materials**, v. 394, n. 122579, 2020.

