



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



PAULO HENRIQUE LIBERATO DA SILVA

**ANÁLISE DA FLOCULAÇÃO DOS MINERAIS HEMATITA E QUARTZO
UTILIZANDO DIFERENTES FLOCULANTES**

Ouro Preto

2023

Paulo Henrique Liberato da Silva

**ANÁLISE DA FLOCULAÇÃO DOS MINERAIS HEMATITA E QUARTZO
UTILIZANDO DIFERENTES FLOCULANTES**

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

S586a Silva, Paulo Henrique Liberato da.
Análise da floculação dos minerais hematita e quartzo utilizando
diferentes floculantes. [manuscrito] / Paulo Henrique Liberato da Silva. -
2023.

48 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Francielle Câmara Nogueira.

Coorientadora: Ma. Stéphânia da Consolação Silva Nogueira.

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

1. Beneficiamento de minério. 2. Floculação. 3. Amido. 4.
Poliacrilamida. I. Nogueira, Francielle Câmara. II. Nogueira, Stéphânia da
Consolação Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.7.06

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Henrique Liberato da Silva

Análise da floculação dos minerais hematita e quartzo utilizando diferentes floculantes

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 30 de agosto de 2023

Membros da banca

Dra -Francielle câmara Nogueira - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Vanderson Eney de Matos - SAMARCO
Eng. João Octávio Carvalho Sáez de Oliveira - Equinox Gold

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 03/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/09/2023, às 20:19, 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 **0585058** e o código CRC **A0C07BFB**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus por iluminar minhas escolhas;

À minha querida família, cujo apoio esteve presente em cada etapa ao longo da minha jornada;

À Bárbara, pelo apoio incansável nos momentos desafiadores;

Ao professor Carlos Alberto Pereira, pela amizade, pelas oportunidades concedidas e pela confiança depositada em mim ao longo da minha trajetória acadêmica;

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

Aos ex-alunos e moradores da República FG, com quem compartilhei vivências enriquecedoras que contribuíram significativamente para o meu crescimento como engenheiro e, sobretudo, como indivíduo;

À Escola de Minas, que proporcionou um ensino de qualidade e acessível. Sinto-me honrado por fazer parte da sua história.

RESUMO

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a influência de flocculantes naturais e sintéticos na seletividade da floculação dos minerais hematita e quartzo. Para esse estudo, foram usadas amostras de hematita ($P_{50} = 20,57\mu\text{m}$) e quartzo ($P_{50} = 7,27\mu\text{m}$). Uma série de experimentos de floculação foi realizada, usando três flocculantes naturais, sendo dois convencionais (amido de milho e amido de mandioca) e um alternativo (fécula de batata), além de um sintético, a poliacrilamida não iônica Praestol 2500. Os resultados foram avaliados a partir do volume ocupado pelos flocos sedimentados em um cone de Imhoff após 10 minutos de sedimentação. Nos ensaios com a hematita, ficou evidente a eficácia da floculação ao usar os diferentes tipos de amido. Além disso, observou-se que a floculação desses minerais é fortemente influenciada pela concentração do flocculante. A aplicação da poliacrilamida não iônica Praestol 2500 também resultou na floculação da hematita, entretanto em menor proporção se comparada aos reagentes naturais. Os resultados relacionados ao quartzo indicaram que a floculação foi insipiente para todos os reagentes avaliados. Destacou-se o amido de milho na dosagem 1000g/t, que gerou o maior volume ocupado pelos flocos da hematita. Em relação ao quartzo, nas mesmas condições o volume ocupado pelos flocos de hematita foi 491% maior que o volume ocupado pelos flocos de quartzo. Estes resultados sugerem a continuidade da pesquisa, apontando a possibilidade de utilização desses reagentes na floculação seletiva em sistemas mistos contendo esses minerais.

Palavras-chave: hematita; quartzo; floculação; amidos convencionais; amidos alternativos; poliacrilamida.

ABSTRACT

The present work was carried out with the aim of studying the influence of natural and synthetic flocculants on the selectivity of flocculation between the minerals hematite and quartz. For this study, samples of hematite (P_{50} - 20.57 μm) and quartz (P_{50} - 7.27 μm) were used. A series of flocculation experiments were conducted, using three natural flocculants, two of which were conventional (corn starch and cassava starch) and one alternative (potato starch), in addition to a synthetic flocculant, non-ionic polyacrylamide Praestol 2500. The results were evaluated based on the volume occupied by the sedimented flocs in an Imhoff cone after 10 minutes of sedimentation. In the experiments with hematite, the effectiveness of flocculation when using different types of starch became evident. Furthermore, it was observed that the flocculation of these minerals is strongly influenced by the flocculant concentration. The application of non-ionic polyacrylamide Praestol 2500 also resulted in the flocculation of hematite, although to a lesser extent compared to the natural reagents. Results related to quartz indicated that flocculation was incipient for all the evaluated reagents. Corn starch stood out at a dosage of 1000g/t, generating the greatest volume occupied by hematite flocs. In relation to quartz, under the same conditions, the volume occupied by hematite flocs was 491% greater than the volume occupied by quartz flocs. These results suggest the continuation of research, pointing to the possibility of using these reagents in selective flocculation in mixed systems containing these minerals.

Keywords: hematite; quartz; flocculation; conventional starches; alternative starches; polyacrylamide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas que ocorrem ao se adicionar um polímero à suspensão.....	13
Figura 2: Comportamento de cargas superficiais em partículas com pH acima ou abaixo do ponto isoelétrico.....	14
Figura 3: Efeito do poliacrilato de sódio na flotação de hematita e quartzo	16
Figura 4: Fluxograma de preparação das amostras minerais	19
Figura 5: Agitador mecânico na posição alta rotação (a) e na posição alto torque (b).....	24
Figura 6: Reator utilizado nos testes de floculação	25
Figura 7: Cone de Imhoff utilizado para aferir o volume dos flocos sedimentados	26
Figura 8: Distribuição granulométrica da hematita	28
Figura 9: Distribuição granulométrica do quartzo	29
Figura 10: Difratoograma de raios-X da amostra de hematita.....	30
Figura 11: Difratoograma de raios-X da amostra de quartzo	31
Figura 12: Estrutura dos polímeros de (a) amilose e (b) amilopectina	32
Figura 13: Experimentos de floculação de hematita com adição de floculantes naturais	33
Figura 14: Grau de dispersão da lama de minério de ferro em função da dosagem de amido.....	34
Figura 15: Experimentos de floculação de quartzo com adição de floculantes naturais	35
Figura 16: Experimentos de floculação de hematita com adição do floculante Praestol 2500	36
Figura 17: Experimentos de floculação de quartzo com adição do floculante Praestol 2500	37

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de escolha de floculante	12
Tabela 2: Agitação em sistemas de floculação	14
Tabela 3: Reagentes utilizados nos experimentos de floculação	21
Tabela 4: Etapas de realização dos testes.....	26
Tabela 5: Graduação e subdivisão do cone de Imhoff	27
Tabela 6: Composição dos amidos	31

SUMÁRIO

1	Introdução	8
2	Objetivos	10
2.1	Objetivos específicos	10
3	Revisão bibliográfica	11
3.1	Propriedades da hematita e do quartzo	11
3.2	Fundamentos teóricos da floculação.....	11
3.3	Parâmetros que influenciam na floculação.....	12
3.3.1	Seleção do floculante	12
3.3.2	Forma de adição.....	12
3.3.3	Ambiente químico	13
3.3.4	Sistema hidrodinâmico	14
3.3.5	Tamanho das partículas	14
3.4	Principais reagentes utilizados na floculação.....	15
3.4.1	Floculante	15
3.4.2	Dispersante	15
3.5	Estudos de casos de floculação.....	16
3.6	Aplicações da floculação em processos industriais	17
3.6.1	Floculação seletiva	17
3.6.2	Espessamento	17
4	Materiais e métodos.....	19
4.1	Preparação das amostras minerais.....	19
4.2	Caracterização das amostras.....	20
4.2.1	Análise granulométrica	20
4.2.2	Densidade das amostras	20
4.2.3	Caracterização mineralógica	20
4.3	Reagentes utilizados	21

4.3.1	Floculantes naturais.....	21
4.3.2	Hexametáfosfato de sódio	22
4.3.3	Praestol	22
4.3.4	Moduladores de pH	23
4.4	Experimentos de floculação	23
5	Resultados e discussão	28
5.1	Caracterização das amostras.....	28
5.1.1	Análise granulométrica	28
5.1.2	Densidade relativa	29
5.1.3	Caracterização mineralógica	30
5.2	Experimentos de floculação	31
6	Conclusões	38

1 INTRODUÇÃO

A floculação desempenha um papel fundamental na área de processamento mineral, sendo um método crucial para aglomeração de partículas finas em processos de separação sólido-líquido, como espessamento e filtração. Através da floculação, as partículas presentes na suspensão, independentemente de sua natureza mineralógica, podem ser aglomeradas formando flocos maiores e mais pesados. Os flocos gerados possuem uma velocidade de sedimentação mais elevada resultando aumento da eficiência desses processos (Baltar, 2010).

O princípio fundamental da floculação abre caminhos para o desenvolvimento da floculação seletiva, que é uma técnica com potencial de aplicação para a concentração de partículas finas. De acordo com França e Massarini (2018), a floculação seletiva pode ser compreendida como um processo de separação seletiva entre partículas sólidas de diferentes minerais presentes em uma suspensão. Isso é alcançado por meio da adição de agentes floculantes, como polímeros, que se adsorvem em partículas sólidas específicas, criando pontes físicas entre elas. O resultado é a formação de flocos compostos por partículas ultrafinas de um mineral específico que podem ser separados dos outros minerais por processos convencionais tais como flotação ou sedimentação.

Historicamente, a floculação seletiva vem sendo testada para aplicação industrial. Coelho (1974) demonstrou, em um estudo, que a primeira instalação industrial a utilizar a floculação seletiva foi a usina localizada na mina de Tilden, em National Mine, Michigan, EUA. Sua operação teve início neste mesmo ano, após 25 anos de pesquisa. Essa usina é de propriedade da Cleveland-Cliffs Iron Co. e possuía uma capacidade de processamento de aproximadamente 10 milhões de toneladas por ano de minério de ferro. A estação de floculação seletiva tinha como objetivo a deslamagem seletiva, uma vez que a flotação era prejudicada devido à elevada proporção de finos.

Apesar do potencial da floculação seletiva, são escassos os relatos relacionados à aplicação industrial deste processo ao longo das últimas décadas. Entretanto, com o avanço da mineração, a escassez de minérios ricos levou a exploração

de litologias mais pobres, com menor granulometria de liberação (Ferreira *et al.*, 2015). Esse cenário evidencia a crescente demanda em beneficiar partículas cada vez menores, tornando-se de extrema importância o aprimoramento das técnicas de concentração, bem como o desenvolvimento de reagentes específicos para esses sistemas.

Diante desse contexto, desenvolveu-se o presente trabalho, que teve como objetivo estudar a influência de floculantes naturais e sintéticos na seletividade da floculação dos minerais hematita e quartzo com granulometria fina. Os resultados contribuem para compreensão da seletividade dos reagentes utilizados no sistema testado, abrindo possibilidades para futuras aplicações da floculação seletiva em sistemas envolvendo esses minerais.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a influência de flocculantes naturais e sintéticos na seletividade da floculação dos minerais hematita e quartzo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar a caracterização física e mineralógica das amostras minerais estudadas;
- b) Analisar a influência da dosagem dos flocculantes convencionais, amido de milho e amido de mandioca, bem como do amido alternativo, a fécula de batata, no processo de floculação dos minerais;
- c) Analisar a influência da dosagem dos flocculante sintético, poliacrilamida não iônica Praestol 2500, no processo de floculação dos minerais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura a respeito de temas relevantes para este trabalho. Neste tópico será discutido a importância da separação de hematita e quartzo na indústria mineral e a relevância da floculação como um método de separação.

3.1 PROPRIEDADES DA HEMATITA E DO QUARTZO

A hematita é um óxido de ferro (Fe_2O_3) que exibe uma estrutura cristalina trigonal, sendo classificado no sistema cristalino trigonal. Esse mineral é comumente encontrado em uma tonalidade marrom avermelhada, podendo variar em intensidade para tons mais escuros. Em termos de aparência, a hematita pode apresentar-se opaca ou com um brilho metálico a sub-metálico. Sua dureza, avaliada na escala de Mohs, situa-se entre 5,5 e 6,5. Quanto às propriedades magnéticas, a hematita exibe magnetização extremamente fraca (Criddle; Stanley, 1993; Deer; Howie; Zussman, 2013).

O quartzo é um mineral composto principalmente por dióxido de silício (SiO_2) e exibe uma estrutura cristalina hexagonal, também classificada no sistema trigonal. Sua estrutura é formada por tetraedros de sílica que se conectam, formando uma rede tridimensional. O quartzo apresenta uma ampla variedade de cores, sendo a mais comum a forma transparente e incolor. Quanto ao brilho, ele é vítreo nas faces e resinoso nas superfícies de clivagem. Em termos de dureza, o quartzo possui uma classificação de 7 na escala de Mohs (Deer; Howie; Zussman, 2013; Shah *et al.*, 2022).

3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA FLOCULAÇÃO

De acordo com Baltar (2021), a floculação de partículas ultrafinas se dá por meio de uma macromolécula que pode se adsorver simultaneamente em várias partículas. Segundo França e Massarini (2018), o principal objetivo da floculação é promover a agregação das partículas sólidas em suspensão, formando aglomerados maiores e mais pesados, chamados de flocos.

O processo de floculação é baseado na utilização de agentes floculantes, também conhecidos como polímeros floculantes, que são adicionados à suspensão de minérios. Esses agentes possuem a propriedade de se adsorverem nas partículas sólidas, criando pontes físicas entre elas. Com isso, as partículas começam a se unir, formando aglomerados conhecidos como flocos. A formação dos flocos é influenciada por diversos fatores, como o tipo de polímero utilizado, sua concentração, o pH do meio, a presença de íons metálicos e outras condições específicas do minério a ser tratado, o que será discutido no tópico seguinte. Esse processo de agregação das partículas permite uma melhor sedimentação e separação sólido-líquido, aumentando a eficiência de operações unitárias pertencentes ao processamento de minérios.

3.3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA FLOCULAÇÃO

Alguns parâmetros que influenciam na floculação seletiva serão mostrados neste tópico.

3.3.1 Seleção do floculante

Para a seleção adequada do floculante, pode-se analisar algumas características associadas a ele, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de escolha de floculante

Classificação	Tamanho da cadeia	densidade de carga	Natureza da carga elétrica
Baixo	$PM < 10^5$	< 25%	Negativa
Médio	$10^5 < PM < 10^6$	25% - 50%	Neutra
Elevado	$PM > 10^6$	> 50%	Positiva

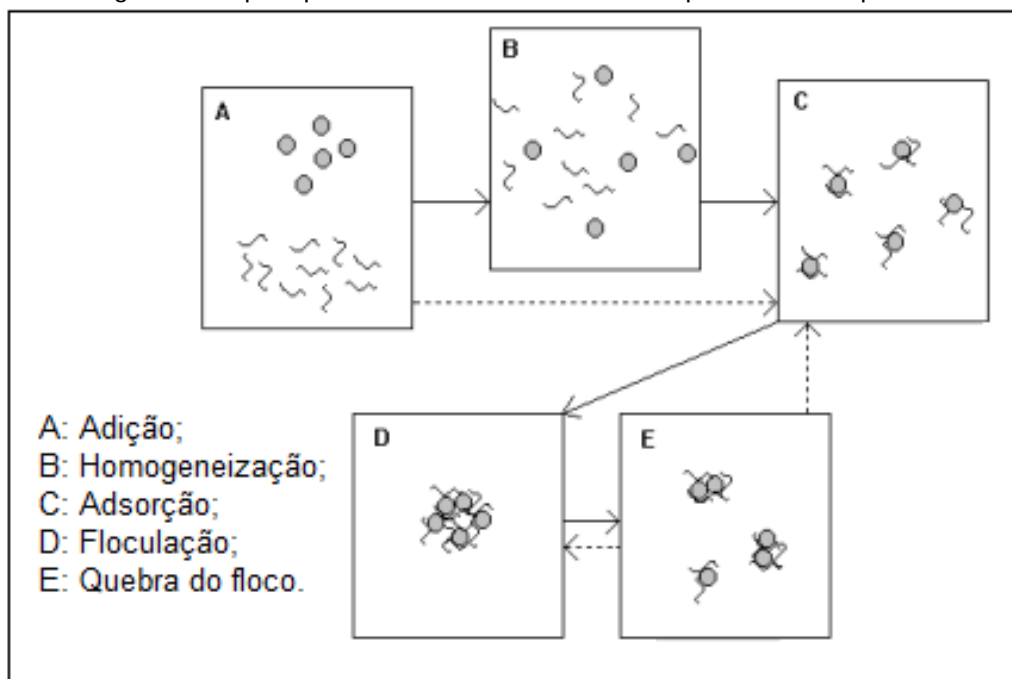
Fonte: adaptado de Baltar (2010)

3.3.2 Forma de adição

De acordo com Gregory (1992), vários processos podem ocorrer simultaneamente durante a adição do reagente, incluindo a homogeneização do polímero na suspensão, a adsorção das moléculas na superfície do sólido, a

acomodação das moléculas adsorvidas, a formação e o crescimento, e a quebra dos flocos. A Figura 1 apresenta uma ilustração dos processos mencionados.

Figura 1: Etapas que ocorrem ao se adicionar um polímero à suspensão



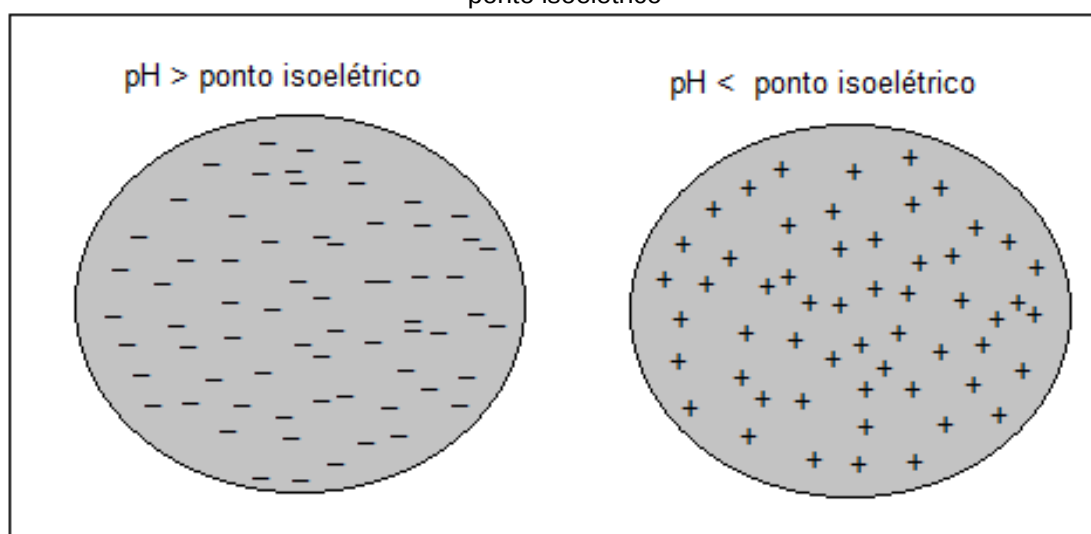
Fonte: Adaptado de Abreu (2018)

3.3.3 Ambiente químico

O ambiente químico da suspensão pode inibir ou potencializar o efeito do polímero. Segundo Mpofu *et al.* (2005), o efeito positivo ocorre quando há a pré-adsorção de íons na superfície mineral, criando sítios atrativos para a adsorção do polímero. Além disso, conforme destacado por Khangaonkar e Subramani (1993), a neutralização parcial da carga elétrica da molécula do polímero reduz a repulsão eletrostática com a superfície mineral.

Por outro lado, o efeito negativo ocorre quando íons carregados de forma oposta interagem com os grupos iônicos do polímero, levando à precipitação ou completa desativação do floculante. (Peng e Di, 1994). É importante ressaltar que essas condições estão diretamente ligadas ao pH do meio, como demonstrado em um estudo realizado por Martins *et al.* (2022), que avaliou o comportamento das cargas superficiais nas partículas minerais em relação ao ponto isoelétrico (PIE). A Figura 2 esquematiza o resultado obtido neste estudo.

Figura 2: Comportamento de cargas superficiais em partículas com pH acima ou abaixo do ponto isoelétrico



Fonte: Adaptado de Martins *et al* (2022)

3.3.4 Sistema hidrodinâmico

O sucesso do processo de floculação requer, como pré-requisito fundamental, a colisão entre as partículas minerais e o floculante (Baltar, 2010). Entretanto, deve-se haver um controle adequado do sistema, evitando uma agitação excessiva que possa resultar na quebra dos flocos formados. Para a análise deste parâmetro alguns estudos recentes sobre floculação mineral foram levantados e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Agitação em sistemas de floculação

Minerais	Rotação (rpm)	Referência
Hematita/Quartzo	300	(Li <i>et al.</i> , 2021)
Calcopirita/Quartzo	330	(Gong <i>et al.</i> , 2010)
Quartzo	400	(Wang <i>et al.</i> , 2022)
Quartzo/caulin	500	(Maruyama; Seki; Igi, 2020)
Hematita/Quartzo	600	(Kemppainen <i>et al.</i> , 2016)

Fonte: Autoria própria (2023)

3.3.5 Tamanho das partículas

Há uma importante correlação entre o tamanho das partículas minerais e o peso molecular do floculante, onde cada faixa de tamanho necessita-se de um peso molecular mínimo para efetivação da floculação.

Moudgil *et al* (1993) conduziram um estudo que demonstrou que um poli(óxido)etileno (POE) de peso molecular 106 foi capaz de flocular com sucesso uma amostra de dolomita abaixo de 37 μm . Entretanto, observou-se que o mesmo polímero não foi capaz de flocular a fração entre 53 e 43 μm desse mesmo mineral. O tamanho das partículas minerais também pode influenciar na concentração dos reagentes, de forma que partículas menores podem exigir menores dosagens e partículas maiores podem exigir elevadas dosagens (Amorim, 2013).

3.4 PRINCIPAIS REAGENTES UTILIZADOS NA FLOCULAÇÃO

Os principais reagentes utilizados na floculação são os floculantes e dispersantes.

3.4.1 Floculante

Segundo Alvim (2023), o floculante é um polímero que pode ser de origem natural ou sintética. Esses polímeros apresentam diferentes grupos polares, podendo ser iônicos ou não iônicos, e possuem massa molecular elevada. Sua classificação em grupos é feita de acordo com a forma como se dissociam na água como mencionado por Bulatovic (2007).

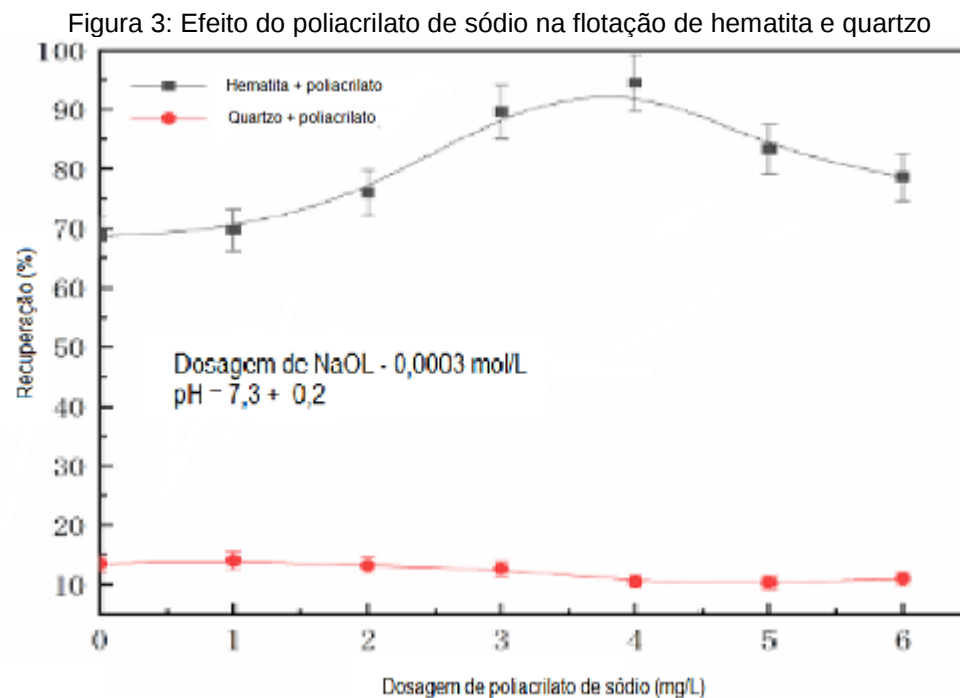
- a) Polieletrólitos aniônicos: (Cl^- , SO_4^- , CH_3COO^-);
- b) Polieletrólitos catiônicos: (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , etc.);
- c) Polieletrólitos anfotéricos: não possuem grupos aniônicos ou catiônicos;
- d) Polímeros não iônicos: possuem grupo polar sem ligação de ânion ou cátion.

3.4.2 Dispersante

De acordo com Luz *et al.* (2010), os dispersantes são reagentes orgânicos ou inorgânicos com a capacidade de individualizar partículas minerais que estão agregadas. Dessa forma, seu uso é comum em sistema com grande fração de partículas ultrafinas.

3.5 ESTUDOS DE CASOS DE FLOCULAÇÃO

No estudo conduzido por CHENG *et al* (2022) foi testado o floculante Poliacrilato de sódio de peso molecular 3.000.000 g/mol e o coletor oleato de sódio na floculação seletiva num sistema envolvendo hematita e quartzo. A Figura 3 mostra os resultados obtidos



Fonte: Adaptado de Cheng *et al* (2022)

É possível observar que na dosagem de 4 mg/L atinge-se a maior recuperação de hematita, estando acima de 90%.

Betancourt *et al.* (2020) compararam a eficiência de alguns reatores na ultrafloculação de quartzo. Nesse estudo foi usado quartzo de pureza maior que 99%, partículas com diâmetro médio de 10,1 μm e uma poliacrilamida de peso

molecular médio como floculante. Os melhores resultados obtidos foram com porcentagem de sólidos em 5% e concentração de reagente de 0,025%.

3.6 APLICAÇÕES DA FLOCULAÇÃO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

A seguir serão mostrados alguns casos industriais em que a floculação foi aplicada e obteve bons resultados.

3.6.1 Floculação seletiva

No trabalho de Coelho (1974) se observou um estudo de caso acerca da primeira instalação industrial a fazer uso da floculação seletiva, localizada na mina de Tilden, em National Mine, Michigan, EUA, a usina é de propriedade da Cleveland-Cliffs Iron Co. e possui uma capacidade de processamento de aproximadamente 10 milhões de toneladas por ano de minério de ferro. A utilização da floculação seletiva nesse processo teve a intenção de fazer uma deslamagem seletiva, já que a flotação era extremamente prejudicada devido à elevada porção de finos.

Tammishetti *et al* (2017) conduziram um estudo sobre o minério proveniente da mina de ferro Noamundi a qual apresentou uma porção de 15-20% do ROM (run of mine) abaixo de 45 μm . Como os métodos de concentração por separação magnética e gravítica não estavam demonstrando eficiência considerável na separação entre ferro e alumina, tomou-se como opção a utilização de floculação seletiva, testada numa planta piloto destinada ao estudo. Nos testes de flotação assíncrona variou-se vazão de ar, concentração de reagentes, porcentagem de sólidos e tipo de floculante.

3.6.2 Espessamento

Trampus; França e Moura (2021), fizeram um estudo acerca do quanto a floculação pode aumentar a eficiência do espessamento no rejeito de minério de ferro. Para tal, usaram o polímero Magnafloc 5250 como floculante, variando sua dosagem até 120g/t, com e sem etapas de coagulação com $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. A

eficiência do processo foi analisada por meio de medidas de velocidade de sedimentação e turbidez do sobrenadante, além da análise da consistência do sedimento por ensaios reológicos. Foi constatado que maiores dosagens proporcionaram sedimentos mais consistentes e maior altura de material sedimentado.

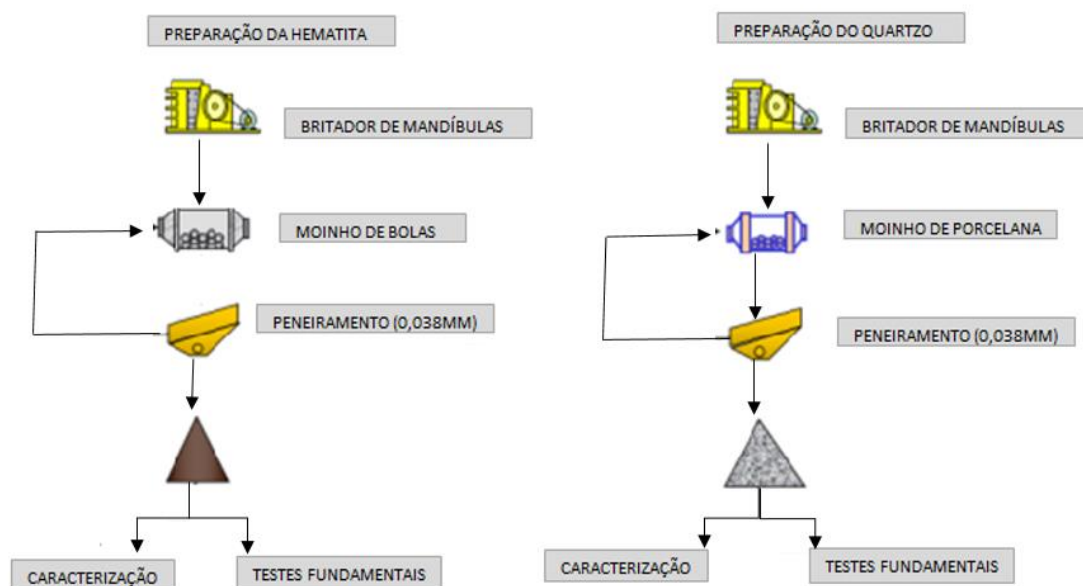
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, estão apresentados os materiais e procedimentos experimentais empregados para conduzir essa pesquisa, que consistem na preparação e caracterização das amostras, bem como na descrição dos experimentos de floculação com os minerais utilizando os diferentes flocculantes. Todos os experimentos foram conduzidos nos Laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS MINERAIS

A amostra de hematita foi obtida em uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, e a amostra de quartzo foi coletada manualmente em um antigo leito de rio, localizado em um distrito de Ouro Preto, MG. Ambas as amostras passaram por três etapas de britagem em um britador de mandíbulas, seguidas por moagem em moinho de bolas. Posteriormente, foram peneiradas a úmido através de uma malha de corte de 0,038mm, homogeneizadas e quarteadas. A Figura 4 mostra o fluxograma de atividades.

Figura 4: Fluxograma de preparação das amostras minerais



Fonte: Autoria própria (2023)

A metodologia empregada neste trabalho segue uma abordagem semelhante à utilizada por Oliveira (2023).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A caracterização das amostras minerais foi feita a partir de análises granulométricas, análises de densidade e caracterização mineralógica.

4.2.1 Análise granulométrica

As análises granulométricas das amostras foram efetuadas com o auxílio do granulômetro a laser CILAS 1064, disponível no Laboratório de Propriedades Interfaciais do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

4.2.2 Densidade das amostras

As densidades das amostras foram medidas utilizando o picnômetro a gás Ultrapyc 1200e Version 4.00 da QUANTACHROME CORPORATION. Este equipamento está disponível no Laboratório de Propriedades Interfaciais do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Um porta amostra com volume igual $58,44 \text{ cm}^3$ foi empregado para realizar as medidas. Essas medições foram conduzidas com uma pressão alvo igual a 17 psi e tempo de purga igual a 4 min.

4.2.3 Caracterização mineralógica

Para identificar os minerais presentes nas amostras, foram feitos ensaios de difratometria de raios-X (DRX) utilizando o método do pó total. Esses ensaios foram conduzidos no Laboratório de Microscopia Óptica e Difração de Raios-X do DEMIN/UFOP, utilizando o difratômetro de raios-X *PanAlytical* modelo *X'Pert3Powder*. O aparelho estava equipado com um tubo de cobre e operou com uma tensão de 45 kV e uma corrente de 40 mA. Foi empregado um filtro de níquel para gerar a radiação $\text{K}\alpha\text{Cu}$, com comprimento de onda de $1,5406 \text{ \AA}$. Foi

utilizado o *software Data Colector*, com uma varredura (2θ) no intervalo de 5° a 90°, com duração aproximada de 14 minutos. Em seguida, os dados obtidos foram tratados através do *software HighScore Plus*.

4.3 REAGENTES UTILIZADOS

A Tabela 3 mostra os reagentes utilizados nos experimentos de floculação. Foram testados dois amidos convencionais: amido de milho e amido de mandioca, além de uma fonte alternativa de amido: fécula de batata. Também foi avaliada uma poliacrilamida não iônica: Praestrol 2500.

Tabela 3: Reagentes utilizados nos experimentos de floculação

Função	Reagente	Marca
Floculante	Amido de milho	Flokit
	Amido de mandioca	Pachá
	Fécula de batata	Aminna
	Praestrol 2500 (P2500)	Solenis
Dispersante	Hexametáfosfato de sódio	Fmaia
Moduladores de pH	Ácido Clorídrico	Neon
	Hidróxido de sódio	Êxodo Científica

Fonte: autoria própria (2023)

4.3.1 Floculantes naturais

A gelatinização prévia dos amidos utilizados como floculantes naturais foi feita utilizando uma proporção de 5 partes de amido para 1 parte de hidróxido de sódio. A "solução mãe" de cada reagente foi preparada com uma concentração de 10.000 mg/l, conforme descrito a seguir:

- Foram pesados 1g do floculante em um béquer de 250ml;
- Adicionaram-se 10ml de água destilada ao béquer contendo o floculante;
- Foram pesados 0,20g de hidróxido de sódio em um béquer de 50ml e adicionou-se 40ml de água destilada;
- A solução de hidróxido de sódio e água destilada foi agitada até que houvesse completa dissolução e homogeneização;

- e) A solução de hidróxido de sódio foi adicionada ao béquer contendo flocculante, e a mistura foi gelatinizada com auxílio de um bastão de vidro;
- f) Após a completa solubilização do reagente, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100ml e seu volume foi completado com água destilada formando a “solução mãe” com uma concentração de 10000mg/l;

Para preparar soluções de flocculante com concentrações menores, foi retirado um volume apropriado da “solução mãe” e diluído com água destilada em balões volumétricos de 1000ml, obtendo então a concentração desejada.

4.3.2 Hexametáfosfato de sódio

- a) Pesaram-se 15g de hexametáfosfato de sódio em um béquer de 250ml;
- b) Adicionaram-se 100ml de água destilada ao béquer;
- c) Com o auxílio de um agitador magnético, o sistema foi completamente homogeneizado;
- d) Transferiu-se a solução para um balão volumétrico de 1000ml e completou-se seu volume com água destilada, formando uma solução de concentração igual a 150mg/l.

4.3.3 Praestol

- a) Pesou-se 0,01g de Praestol em um béquer de 250ml;
- b) Adicionou-se ao béquer 50 ml de água destilada;
- c) A solução foi homogeneizada utilizando um agitador magnético, mantendo-se a temperatura a 30°C;
- d) A solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 ml e completou-se o volume com água destilada, formando uma solução 0,01% p/v.

4.3.4 Moduladores de pH

Foram preparadas soluções de ácido clorídrico com concentrações 1%, 5% e 10% v/v.

- a) Adicionou-se 50ml de água destilada em três béqueres de 250ml cada;
- b) Em uma capela de exaustão, mediu-se com auxílio de uma pipeta os volumes de 1ml, 5ml e 10ml de ácido clorídrico (HCl – 37%), de acordo com as respectivas concentrações, e transferiu-se para cada um dos béqueres contendo água destilada;
- c) As soluções foram transferidas para balões de 100ml, e completou-se o volume com água destilada.

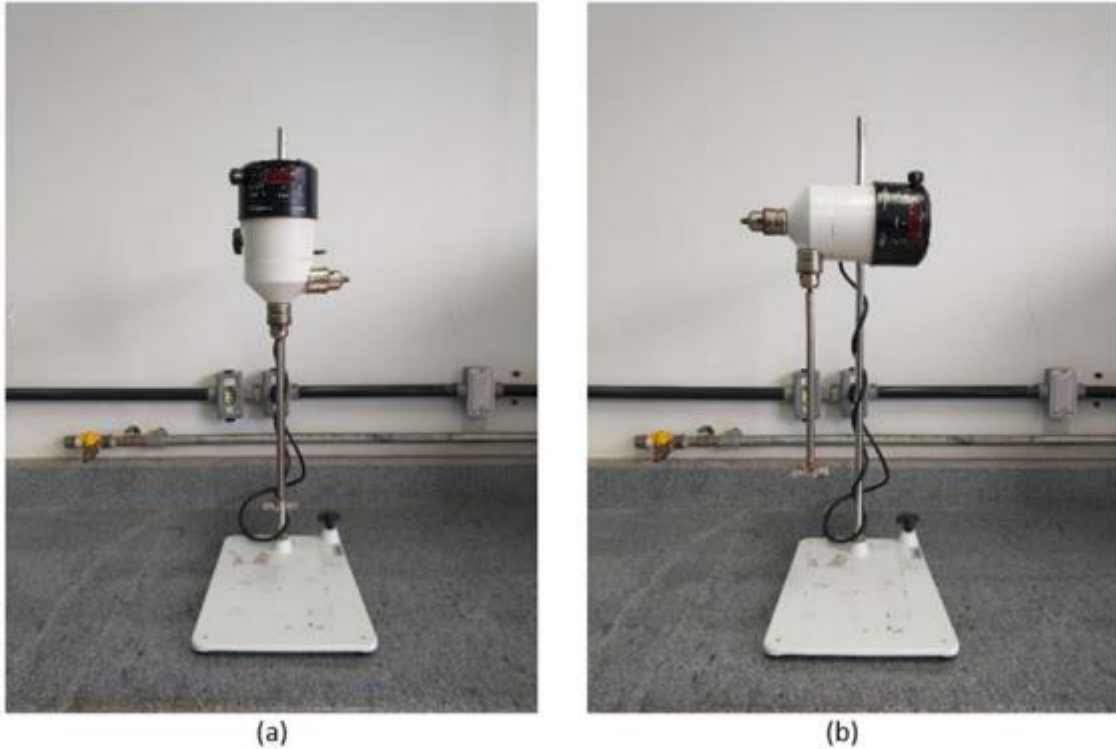
As soluções de hidróxido de sódio foram preparadas com concentrações de 1%, 5% e 10% p/v.

- a) Pesaram-se as massas de 1g, 5g e 10g de hidróxido de sódio em três béqueres de 50ml cada;
- b) Adicionou-se 30ml de água destilada em cada um dos béqueres e homogeneizaram-se as soluções com auxílio de um agitador magnético;
- c) As soluções foram transferidas para balões de 100ml e tiveram o volume completado com água destilada.

4.4 EXPERIMENTOS DE FLOCULAÇÃO

Foram conduzidos testes de floculação empregando um agitador mecânico do modelo 713D, fabricado pela empresa Fisatom Equipamentos Científicos Ltda. Para promover a agitação, utilizou-se uma hélice com um diâmetro de 50 mm, contendo 6 aletas. Essa hélice foi acoplada a uma haste de dimensões Ø9 x 220 mm e conectada a um motor de rotação ajustável, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Agitador mecânico na posição alta rotação (a) e na posição alto torque (b)



Fonte: Oliveira (2023)

Para a realização da etapa de dispersão, a rotação do equipamento foi setada em 2000 rpm (Figura 5 a). Já na etapa de floculação, a configuração foi alterada para a posição de alto torque (Figura 5 b), ajustando a velocidade para 150 rpm.

A Figura 6 mostra o reator utilizado nos experimentos, fabricado em cloreto de polivinila (PVC), com as seguintes dimensões: diâmetro de 75mm e altura igual a 140 mm.

Figura 6: Reator utilizado nos testes de floculação



Fonte: Autoria própria (2023)

A metodologia para realização dos experimentos de floculação empregada neste trabalho baseou-se no estudo realizado por Oliveira (2023). Foram utilizados a os parâmetros operacionais mais eficazes encontrados pelo autor: velocidade de condicionamento: 150 rpm e tempo de floculação igual a 120 segundos.

Os testes foram realizados de acordo com as seguintes etapas:

- a) Foram adicionadas ao reator 10g do mineral em questão em cada etapa analisada;
- b) Foram adicionados 100ml de água destilada ajustada ao pH 10,5;
- c) Adicionou-se 50ml da solução de dispersante, resultando em uma concentração final de 50mg/L do sistema;
- d) Foi feito o condicionamento do sistema a 2000rpm por 10 minutos;
- e) Foi adicionado o floculante ao sistema, na concentração adequada à cada bateria de experimentos. A posição do agitador foi ajustada para alto torque, com a velocidade de rotação fixada em 150 rpm, e o sistema foi condicionado por mais 120 segundos;
- f) Após o processo de floculação, a suspensão contendo os flocos foi transferida para o cone de Imhoff. O sistema permaneceu em sedimentação por 10 minutos e, ao final desse período, o volume dos flocos sedimentados foi medido.

A Tabela 4 apresenta a distribuição dos experimentos realizados, variando a dosagem de cada reagente.

Tabela 4: Etapas de realização dos testes				
Etapa	1ª ETAPA			2ª ETAPA
Floculante	Amido de milho	Amido de mandioca	Fécula de batata	Praestol P2500
Dosagem (g/t)	250	250	250	10
	500	500	500	25
	1000	1000	1000	50
	-	-	-	100

Fonte: Autoria própria (2023)

O cone de Imhoff, fabricado pela Laborglass Brasil (Figura 7), foi empregado para medir o volume dos flocos sedimentados nas diferentes condições. Esse equipamento possui uma altura de 480mm, diâmetro superior de 120mm e capacidade de 1000ml.

Figura 7: Cone de Imhoff utilizado para aferir o volume dos flocos sedimentados



Fonte: Autoria própria (2023)

A graduação do cone de Imhoff utilizado está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Graduação e subdivisão 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: Oliveira (2023)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

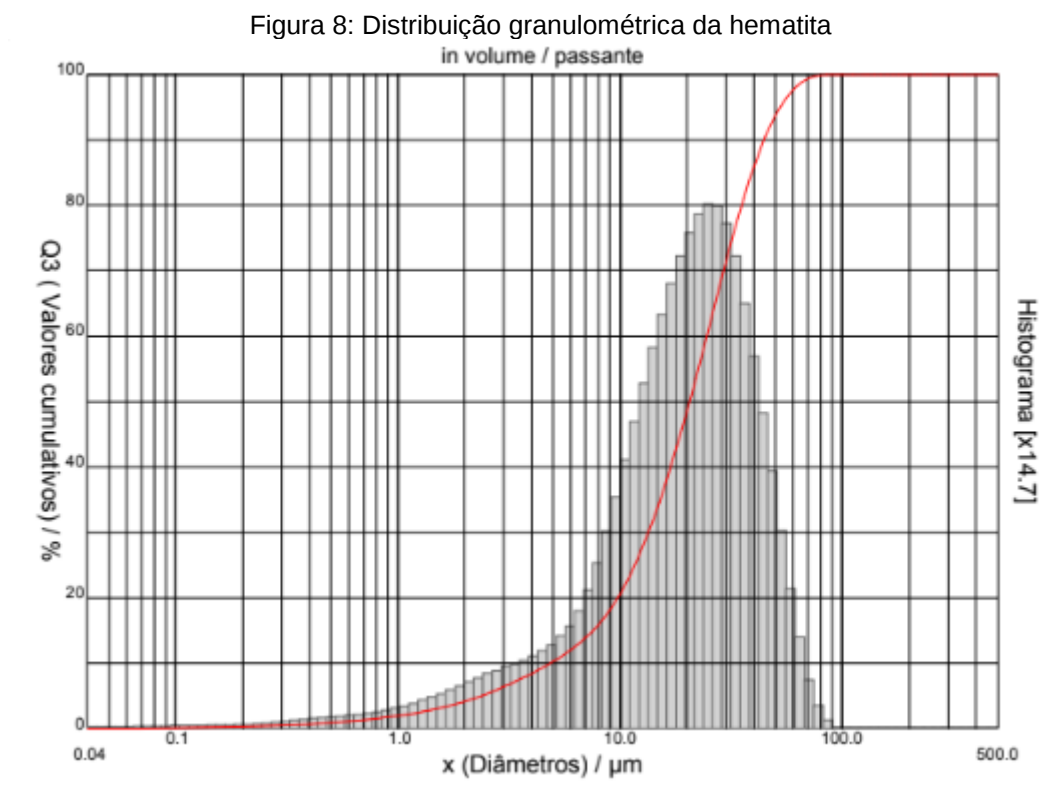
Neste capítulo, são apresentados os resultados e as análises dos experimentos realizados neste trabalho.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste tópico, estão apresentados os resultados referentes à caracterização granulométrica, mineralógica, além da densidade das amostras.

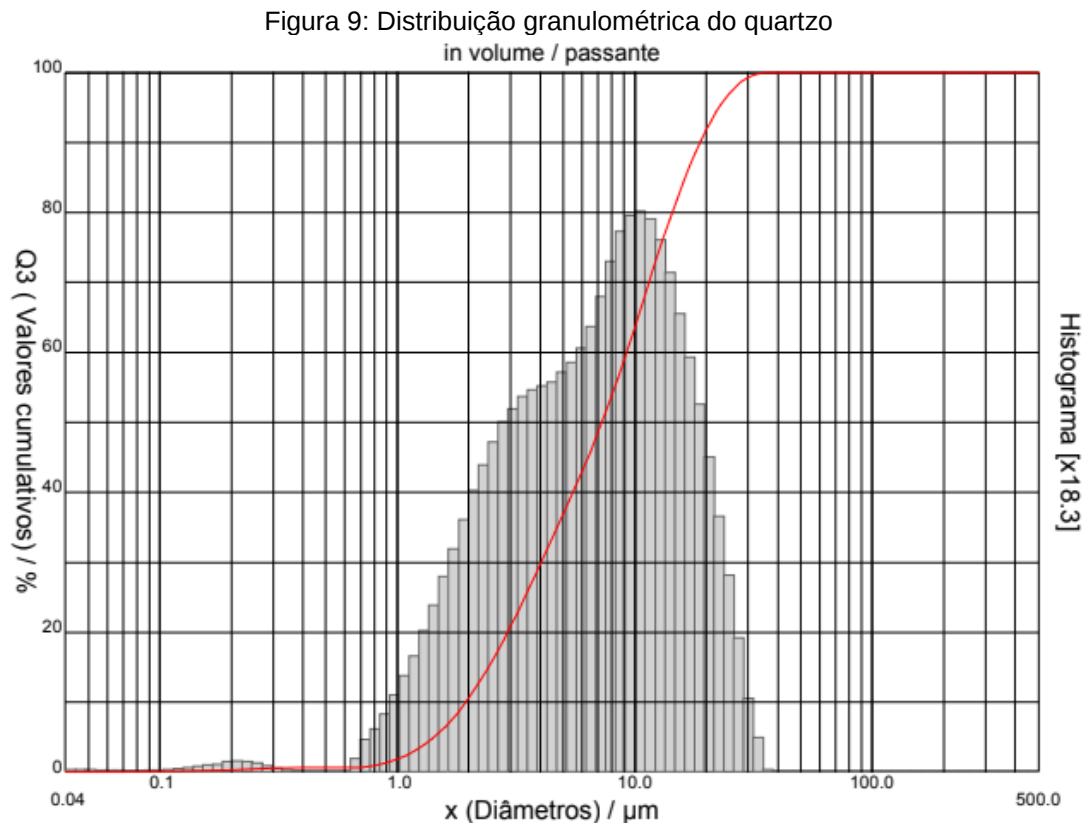
5.1.1 Análise granulométrica

O gráfico da Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica da hematita. Os valores de P_{90} e P_{50} foram de $44,45\mu\text{m}$ e $20,57\mu\text{m}$, respectivamente, com um diâmetro médio de $23,12\mu\text{m}$ e um percentual de lamas (passante em $10\mu\text{m}$) de 20,62%.



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da Figura 9 apresenta a distribuição granulométrica do quartzo. Os valores de P_{90} e P_{50} foram de 18,84 e 7,27 μm , respectivamente, com um diâmetro médio de 8,97 μm e percentual de lamas (passante em 10 μm) 63,66%. Pela análise das distribuições granulométricas apresentadas, é possível observar que a granulometria do quartzo foi menor que da hematita, já que a porcentagem abaixo de 10 μm foi de 63,66 e 20,62%, respectivamente.



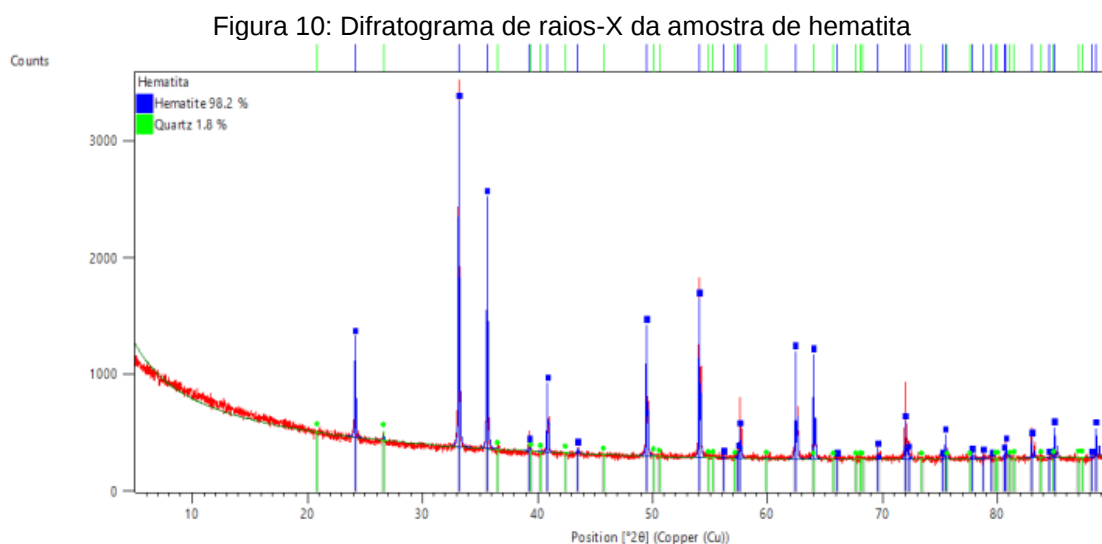
Fonte: Autoria própria (2023)

5.1.2 Densidade relativa

Os valores apresentados correspondem a média de três medições. Os resultados obtidos para a densidade da hematita e quartzo foram de 5,37g/cm³ e 2,69g/cm³, respectivamente. A densidade do quartzo encontrada mostrou-se próxima àquela reportada por Dana (1981), que foi de aproximadamente 2,65g/cm³. Da mesma forma, a densidade da hematita também ficou próxima à encontrada por Dana (1981), sendo 5,26g/cm³.

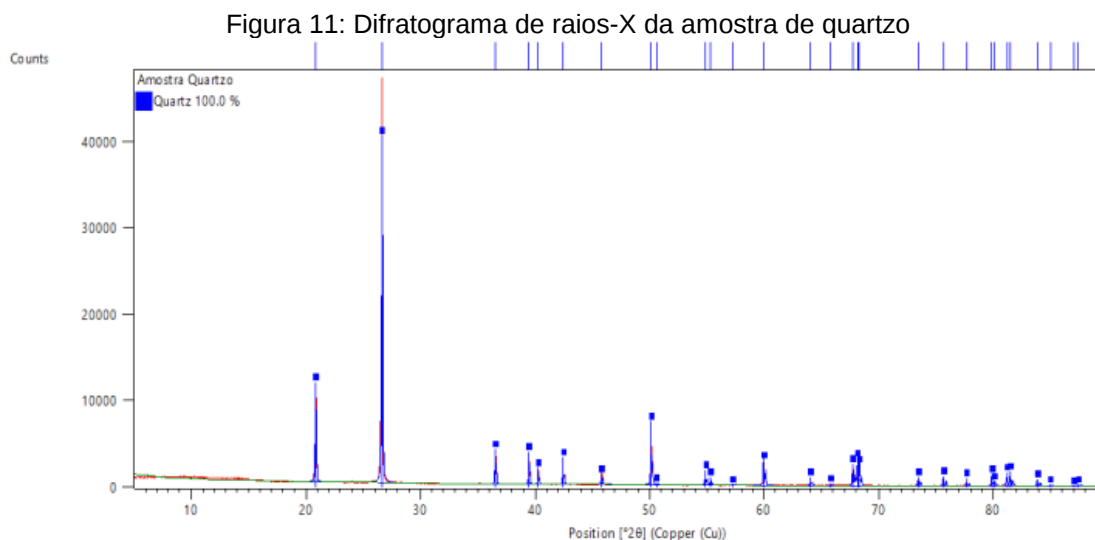
5.1.3 Caracterização mineralógica

Os resultados da difração de raios-X das amostras foram analisados comparando-se os valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos em relação às amostras de referência. Para essa análise, empregou-se o *software HighScore Plus*. Além disso, por meio desse *software*, uma avaliação quantitativa das fases minerais identificadas foi conduzida. Na Figura 10, é possível visualizar o difratograma de raios-X da amostra de hematita utilizada para o estudo. É evidente que 98,2% da amostra é composta pelo mineral hematita, enquanto 1,8% é composta por quartzo.



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 11 apresenta o difratograma de raios-X obtido para a amostra de quartzo. A análise confirma que a amostra é composta 100% pelo mineral quartzo.



Fonte: Autoria própria (2023)

5.2 EXPERIMENTOS DE FLOCULAÇÃO

A principal diferença entre os três amidos testados diz respeito à porcentagem de amilose e amilopectina em sua composição, que é mostrado na Tabela 6.

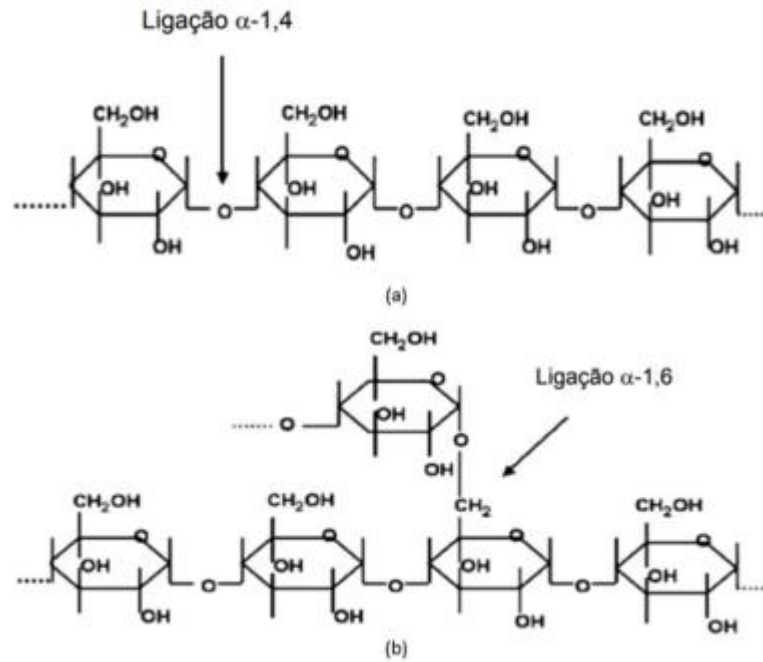
Tabela 6: Composição dos amidos

	Amido de milho	Amido de mandioca	Fécula de batata
Amilose (%)	25	17	20
Amilopectina (%)	75	83	80

Fonte: Adaptado de Cereda (2001)

A amilose (Figura 12 a) tem uma estrutura linear e menor massa molecular, o que resulta em interações menos eficazes com as partículas. A amilopectina (Figura 12 b), por sua vez, atua como um agente floculante eficaz para hematita devido à sua estrutura ramificada e maior massa molecular em comparação com a amilose. Estudos demonstraram que, quando combinadas, a amilose suprime a habilidade da amilopectina de flocular todas as partículas do minério de ferro e aumenta ligeiramente a floculação seletiva (Neitzke, 2020).

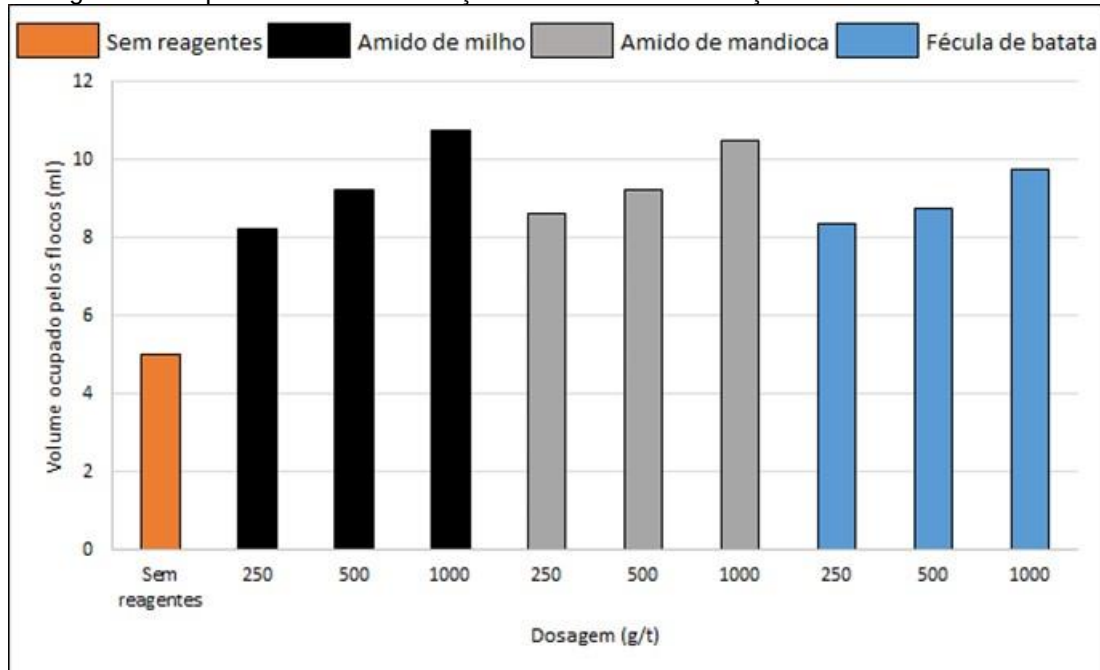
Figura 12: Estrutura dos polímeros de (a) amilose e (b) amilopectina



Fonte: Pearse (2005)

O gráfico da Figura 13 apresenta os resultados do volume ocupado pelos flocos de hematita variando a dosagem dos flocculantes naturais. Foi possível observar que os sistemas apresentaram comportamento similar: o aumento da dosagem de flocculante resultou em um aumento no volume ocupado pelos flocos. Esses resultados comprovam a eficiência dos amidos na floculação da hematita.

Figura 13: Experimentos de floculação de hematita com adição de floculantes naturais



Fonte: Autoria própria (2023)

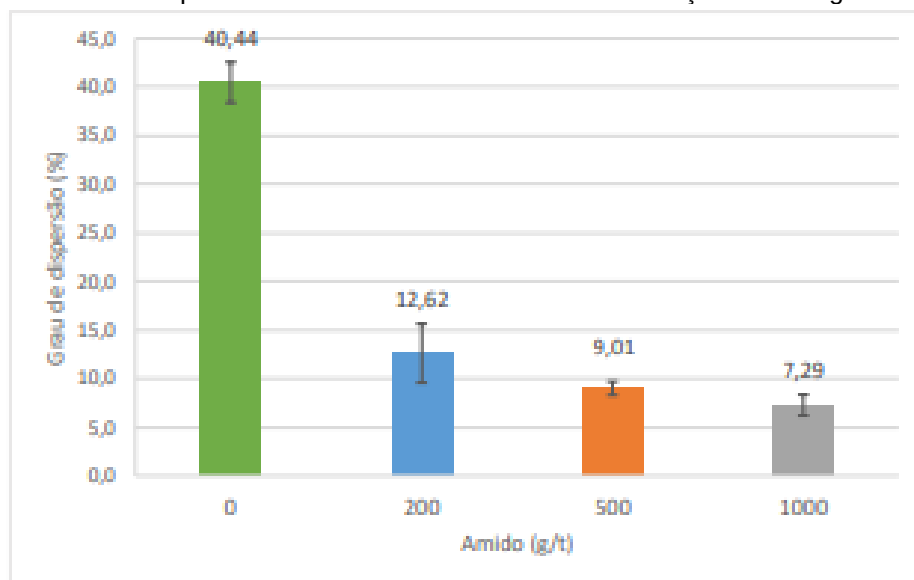
Pela análise do gráfico, pôde-se observar que o amido alternativo, a fécula de batata, apresentou o menor volume ocupado pelos flocos, quando comparado com os outros amidos convencionais, independente da dosagem utilizada. Tal fato pode estar relacionado ao tamanho dos flocos formados, pois a partir de análise visual macroscópica os flocos demonstraram ser consideravelmente menores que os formados com a adição dos outros dois amidos. Entretanto, a determinação dos tamanhos dos flocos é necessária para comprovação dessa hipótese.

Os resultados obtidos utilizando os amidos convencionais mostraram-se próximos entre si, e o maior volume ocupado pelos flocos foi observado para a dosagem de 1000g/t utilizando o amido de milho. Esse aumento no volume foi igual a 116 % em comparação com o sistema sem reagente.

Tais resultados encontrados nesta pesquisa corroboram com o estudo de Alvim (2023), cujos resultados estão apresentados no gráfico da Figura 14. Nesse estudo, foi avaliado o grau de dispersão de uma lama de minério de ferro em relação à dosagem de amido de milho, sendo observado que o menor grau de dispersão (7,29%) ocorreu na dosagem de 1000g/t. Além disso, Shrimali *et al*

(2018) também observaram que o amido de milho foi o melhor depressor para hematita na flotação reversa de minério de ferro, resultando na depressão de 97,7% do material.

Figura 14: Grau de dispersão da lama de minério de ferro em função da dosagem de amido



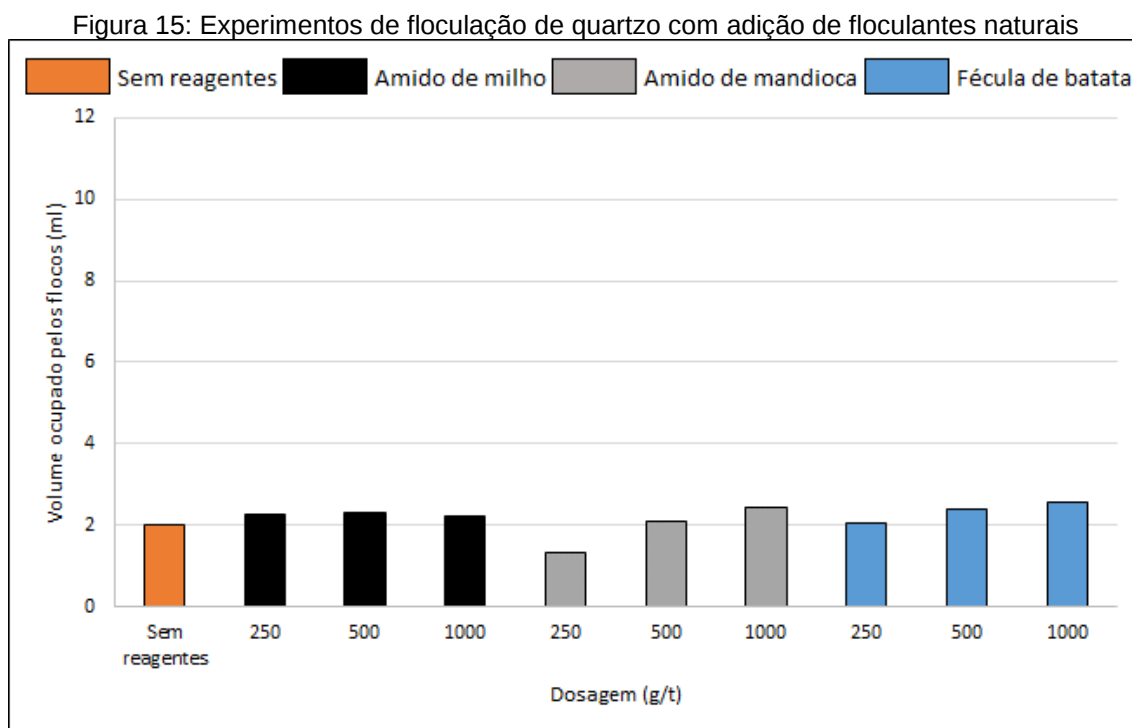
Fonte: Alvim (2023)

O gráfico da Figura 15 apresenta os resultados obtidos nos experimentos de floculação do quartzo utilizando os floculantes naturais. A análise dos resultados revela que a floculação foi praticamente inexpressiva para todos os tipos de amido testados, independente das dosagens utilizadas. Esse fato sugere a viabilidade de utilização desses reagentes para a floculação seletiva de minérios de ferro compostos majoritariamente por esses minerais.

Estudos semelhantes conduzidos por Li *et al* (2021) e Oliveira (2023), corroboram com esses resultados, demonstrando que ao testar a eficiência de floculação do amido de milho sobre o quartzo, não houve efetividade.

Vieira (2019) testou alguns compostos naturais e modificados na floculação de quartzo, dentre estes, a fécula de batata. Assim como no presente estudo, o quartzo não sofreu influência significativa ao se adicionar tal reagente.

No estudo de Leite (2019), tornou-se evidente que ao quantificar a quantidade de amido adsorvido na superfície do quartzo, os valores são irrelevantes em relação à dosagem, o que justifica os resultados de não floculação obtidos.



Fonte: Autoria própria (2023)

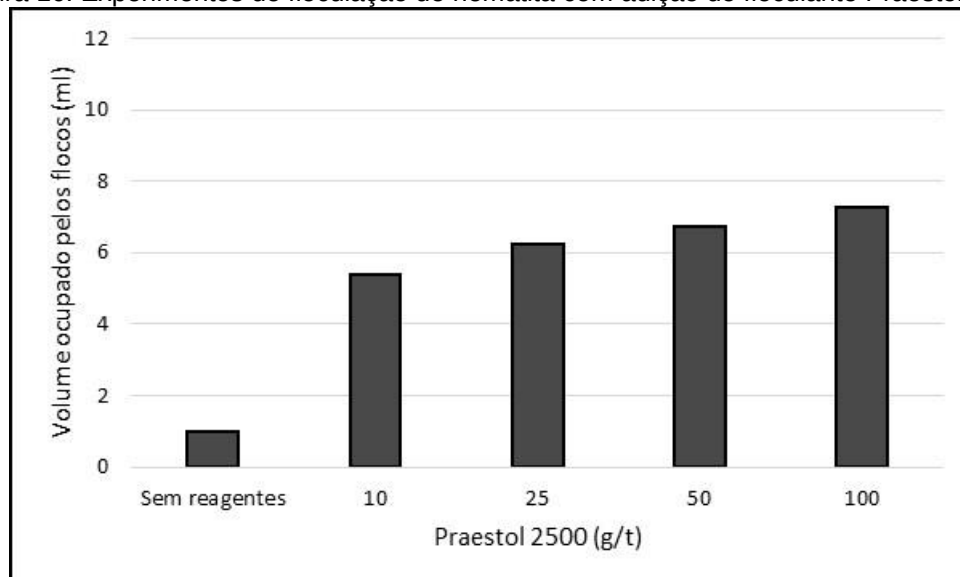
O gráfico da Figura 16 mostra os resultados obtidos nos ensaios de floculação de hematita com o uso do floclante sintético, a poliacrilamida não iônica Praestol 2500. Da mesma forma que observado para os floclantes naturais, foi evidenciado que o volume ocupado pelos flocos aumentou à medida que a dosagem da floclante aumentou, alcançando o maior volume com a dosagem de 100g/t. Em relação ao sistema na ausência de floclante, houve um aumento de 45 % no volume ocupado pelos flocos.

Entre os agentes floclantes de origem sintética, aqueles mais frequentemente empregados são as poliacrilamidas de elevado peso molecular, pois devido à sua extensa cadeia de moléculas adquirem um poder floclante sobre a hematita. Essas substâncias se destacam por sua capacidade de gerar aglomerados relativamente grandes e robustos. As poliacrilamidas não iônicas

correspondem aos polímeros neutros sintéticos mais prevalentes na indústria. Sua obtenção se dá mediante a polimerização da acrilamida (Alvim, 2023).

Em um estudo realizado por Alvim (2023), ensaios de floculação seletiva foram conduzidos com o mesmo floculante, porém num sistema envolvendo hematita, goethita e quartzo. Em condições similares, na dosagem de 100g/t, foi obtida uma recuperação mássica de 89,8% e um teor de ferro de 51,3% no material sedimentado. Isso destaca a eficácia desse floculante na floculação seletiva da hematita.

Figura 16: Experimentos de floculação de hematita com adição do floculante Praestol 2500



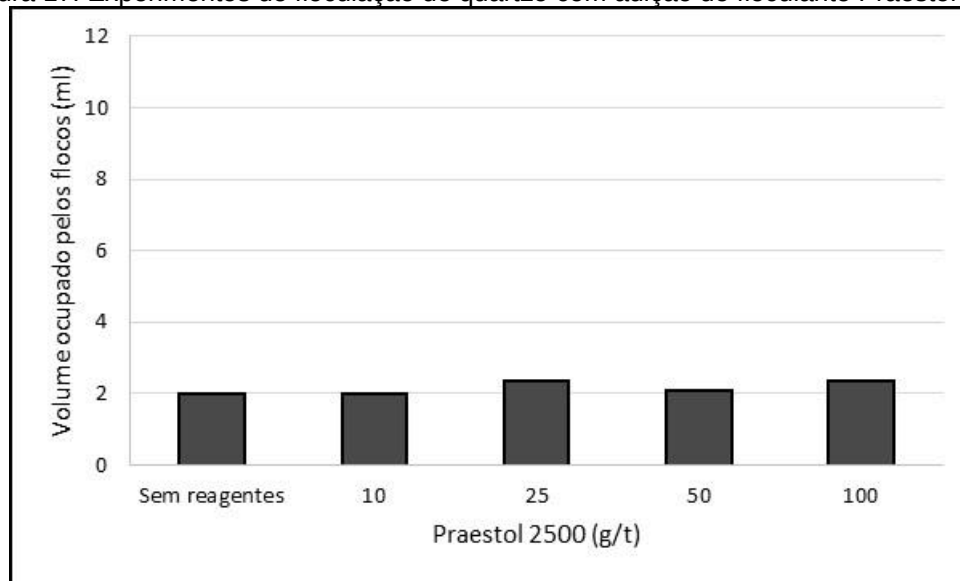
Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico da Figura 17 mostra os resultados obtidos nos ensaios de floculação de quartzo com o uso do floculante sintético Praestol 2500, sob as mesmas condições dos ensaios realizados para a hematita com esse mesmo reagente. A partir da análise do gráfico, é possível observar que o volume ocupado foi semelhante tanto na presença quanto na ausência do reagente, o que indica que o floculante não teve um efetivo significativo na formação dos flocos do mineral quartzo.

Em um estudo sobre a aplicação de poliacrilamidas na flotação reversa de minério de ferro, Oliveira (2016) observou que o grau de dispersão do quartzo

na presença de poliacrilamidas não iônicas ficava abaixo de 10%, mostrando-se efetiva na floculação. Entretanto, uma possível razão para ausência de floculação no presente trabalho pode estar relacionada ao peso molecular da poliacrilamida, conforme mostrado por Alvim (2023). Em um sistema envolvendo quartzo e minerais ferro, o teor de sílica no material sedimentado após floculação com o reagente em questão foi de 16,4%.

Figura 17: Experimentos de floculação de quartzo com adição do floculante Praestol 2500



Fonte: Autoria própria (2023)

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível compreender a influência do tipo de floculante e das dosagens dos reagentes empregados na floculação de hematita e do quartzo. Isso contribuiu para entender se os reagentes usualmente utilizados no beneficiamento do minério de ferro podem ser adequados são adequados para futuros estudos de floculação seletiva em sistemas envolvendo esses minerais.

Foi comprovada a eficácia da floculação da hematita utilizando diferentes tipos de amido, e observou-se que a floculação desses minerais é fortemente influenciada pela concentração do floculante. O emprego da poliacrilamida não iônica Praestol 2500 também resultou na floculação da hematita, entretanto em menor proporção que os reagentes naturais.

Quanto aos resultados relacionados ao quartzo, corroboraram as expectativas da pesquisa, indicando que a floculação desse mineral foi insipiente para os reagentes testados. Estes resultados sugerem a viabilidade da aplicação da floculação de forma seletiva utilizando esses reagentes, que pode ser usada como método de separação de partículas finas.

O amido de milho, na dosagem 1000g/t, se destacou como o reagente que gerou o maior volume ocupado pelos flocos da hematita. Esse volume foi 491% acima do volume ocupado pelos flocos de quartzo, nas mesmas condições.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. P. V. F. Estudos de dispersão/floculação seletiva de lama de minério de ferro. 2018. Dissertação (Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/10740/1/DISSERTA%3%87%83O_EstudosDispers%3%a3oFlocula%3%a7%3%a3o.pdf . Acesso em: 15 jun. 2023.
- ALVES, B. S. G. Análise das variáveis do processo de coagulação-floculação para clarificação de água superficial. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/13602/1/BrunoDaSilvaGoncalvesAlves-min.pdf> . Acesso em: 29 jul. 2023.
- ALVIM, E. S. Floculação seletiva de lama de minério de ferro com amido e poliacrilamidas. 2023. Dissertação (Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/16270/1/DISSERTA%3%87%83O_Flocula%3%a7%3%a3oSeletivaLama.pdf . Acesso em: 15 jul. 2023.
- AMORIM, I. B. S. F. Influência do tamanho das partículas na flotação. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/710/o/ISABELLA_BOAVENTURA_DE_SO_UZA_FREZZA_AMORIM.pdf . Acesso em: 17 jul. 2023.
- ARAUJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C.; Reagents in iron ores flotation. In: Minerals Engineering, vol. 8, p. 219-224, 2005.
- BALTAR, C. A. M. Processos de Agragação, Cap. 13. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves. Tratamento de minérios. CETEM/MCT, 2010.
- BETANCOURT, F. *et al.* Comparison of ultra-flocculation reactors applied to fine quartz slurries. Minerals Engineering, v. 148, p. 106074, mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687519304856> . Acesso em: 16 maio. 2023.
- BOLTO, B.; GREGORY, J., 2007. Organic polyelectrolytes in water treatment. Water Research, 41, 2301-2324. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17462699/> . Acesso em: 09 ago. 2023.
- BRITO, R. A. Ozonização catalítica de chorume proveniente do aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP na presença de ferro em sistema contínuo. 2014. Dissertação (M. Sc.) - Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

BULATOVIC, S. M. Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice Flotation of Sulfide Ores. [s.l.: s.n.].

CAMP, T. R. Flocculation and flocculation basins. Proc. American Society of Civil Engineers. 79, 1953.

CARVALHO, B. C. L. de. Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2346/1/DISSERTA%3%87%83O_AproveitamentoMin%3%a9riosFerro.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023.

CHENG, K. *et al.* The flotation of fine hematite by selective flocculation using sodium polyacrylate. Minerals Engineering, v. 176, p. 107273, jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687521005021>. Acesso em: 14 maio. 2023.

COELHO, E., M. Floculação seletiva: Princípios Básicos e Aplicações. II Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro, 1974.

CRIDDLE, A. J.; STANLEY, C. J. (EDS.). Quantitative Data File for Ore Minerals. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.

DALSASSO, R. L. Estudo de diferentes materiais para floculação em meio granular, precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/101606/222214.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 maio. 2023.

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

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. An introduction to the rock-forming minerals. 3. ed ed. London: The Mineralogical Society, 2013.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.14, p.597-647

FERREIRA, R. F.; SILVA, R. G. DA; MARQUES, M. L. S. RELAÇÃO ENTRE GRAU DE METAMORFISMO E MALHA DE LIBERAÇÃO DE ITABIRITOS COMPACTOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, v. 12, n. 2, p. 140–145, 2015.

FUERSTENAU, D. W; HEALY, T. W. Principles of mineral flotation. New York: Academic Press; 1972. Chapter 6, Adsorptive bubble separation techniques, p. 91-131.

GONG, J. *et al.* Reducing quartz gangue entrainment in sulphide ore flotation by high molecular weight polyethylene oxide. International Journal of Mineral Processing, v. 97, n. 1–4, p. 44–51, nov. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751610000918> . Acesso em: 12 abr. 2023.

GREGORY, J. (1988). Polymer Adsorption and Flocculation in Sheared Suspensions, Colloids and Surfaces, 31, 231-253. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0166662288801963> . Acesso em: 13 abr. 2023.

GREGORY, J. (1992). Flocculation of Fine Particles. In: Mavros, P., Matis, K.A. (eds), Innovations in Flotation Technology, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 101-124.

HENDERSON, J.M., WHEATLEY, A.D., 1987. Factors Effecting a Loss of Flocculation Activity of Polyacrylamide Solutions: Shear Degradation, Cation Complexation, and Solution Aging. Journal of Applied Polymer Science, vol. 33, pp. 669-684.

KEMPPAINEN, K. *et al.* Flocculation of fine hematite and quartz suspensions with anionic cellulose nanofibers. Chemical Engineering Science, v. 148, p. 256–266, jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250916301683> . Acesso em: 11 jul. 2023.

KHANGAONKAR, P. R.; SUBRAMANI, K. J. B. (1993). Flocculation of Hematite Fines by Anionic Polyacrylamide Polymers. Minerals Engineering, vol. 6, no 7, pp. 765-774. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/089268759390007A> . Acesso em: 10 maio. 2023.

KHERADMAND, H., FRANÇOIS, J., PLAZANET, V., 1990. Effect of Additives on the Degradation of Acrylamide-Acrylic Acid Copolymer in Aqueous Solution. Journal of Applied Polymer Science, vol. 39, pp. 1847-1857.

LEITE, A. M. C. 2019. Amido natural e modificado como floculante de lama de minério de ferro. Disponível em: [https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11905/1/DISSERTA%cc3%87%cc3%83O_AmidoNaturalModificado.pdf](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11905/1/DISSERTA%c3%87%cc3%83O_AmidoNaturalModificado.pdf) . Acesso em 25 ago 2023.

LI, L.; SHEN, S.; YUAN, Z.; WANG, H. Loss mechanism of fine-grained ilmenite in magnetic separation, China Min. Mag. 27 (2018) 138–144 (in Chinese). Disponível em: <http://www.chinaminingmagazine.com/en/article/doi/10.12075/j.issn.1004-4051.2018.11.024> . Acesso em: 21 abr. 2023.

LI, M. *et al.* Separation of ultra-fine hematite and quartz particles using asynchronous flocculation flotation. *Minerals Engineering*, v. 164, p. 106817, 1 abr. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687521000467>. Acesso em: 10 maio. 2023.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3.ed. Campinas: Átomo, 2010.

LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). Tratamento de Minérios 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

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.

MATOS, V. E., PERES, A. E. C., BRANDÃO, P. R. G.; Estado de agregação e dispersão de um minério de ferro na presença de diferentes tipos de amidos. In: *Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, Poços de Caldas, MG, 2015.

MARTINS, G. S. *et al.* Aplicação de polímeros na floculação de rejeito de caulim: efeitos da variação de concentração e tipo de floculante. *Química Nova*, v. 45, p. 543–549, 22 jul. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bsSMqJwsp5XpDs8hWJvsGQt/#>. Acesso em: 23 jul. 2023.

MARUYAMA, H.; SEKI, H.; IGI, A. Flocculation of quartz and kaolin by alginate-protamine complex. *Biochemical Engineering Journal*, v. 162, p. 107713, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X20302679>. Acesso em: 19 abr. 2023.

MATHUR, S., SINGH, P., MOUDGIL, B. M. Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations. *International Journal of Mineral Processing*, v. 58, p. 201-222, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751699000721>. Acesso em: 02 ago. 2023.

MOUDGIL, B. M.; BEHL, S.; PRAKASH, T. S. 1993. Effect of particle size in flocculation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 158, 511-512.
MPOFU, P.; ADDAI-MENSAH, J.; RALSTON, J. (2005). Interfacial chemistry, particle interactions and improved dewatering behaviour of smectite clay dispersions. *International Journal of Mineral Processing*, 75, 155-171.

Neitzke, P. R. M. C. 2020. Flotabilidade de Hematita e Quartzo com Amina e Amido Dados em Microemulsões e Nanoemulsões. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/29008/1/Flotabilidadehematitaquartzo_Neitzke_2020.pdf. Acesso em 25 ago. 2023.

OLIVEIRA, J. O. C. S. Flocculação dos sistemas hematita-goethita e quartzo utilizando amido de milho. 2023. 58 f. Monografia (Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5550/6/MONOGRRAFIA_Flocula%C3%A7%C3%A3oSistemasHematita.pdf . Acesso em: 04 abr. 2023.

OWEN, A.T., FAWELL, J.D., SWIFT, J. D., 2007. The preparation and ageing of acrylamide/acrilate copolymer flocculant solutions. *International Journal of Mineral Processing*, 84, 3-14. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751607001032?via%3Dihub>. Acesso em: 05 jul. 2023.

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.

PENG, F. F.; DI, P. (1994). Effect of Multivalent Salts - Calcium and Aluminum on the Flocculation of Kaolin Suspension with Anionic Polyacrylamide. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 164, pp. 229-237. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979784711611>. Acesso em: 02 ago. 2023.

READ. A.D. “Selective Flocculation: One of the Promising Methods for the recovery of fine particles”, trabalho apresentado no I Seminário de Química de Superfície y Flotación, Santiago, Chile (1974).

SHAH, S. A. *et al.* Texture and Trace Element Geochemistry of Quartz: A Review. *Minerals*, v. 12, n. 8, p. 1042, ago. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/12/8/1042> . Acesso em: 15 maio. 2023.

SHRIMALI, K.; ATLURI, V.; WANG, Y.; BACCHUWAR, S.; WANG, X.; MILLER, J. D. 2018. The nature of hematite depression with corn starch in the reverse flotation of iron ore. *J. Colloid Interface Sci.* 524, 337–349. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.04.002>. Acesso em: 21 jun. 2023.

SHYLUK, W. P.; STOW, F. S. (1969). Aging and loss of flocculation activity of aqueous polyacrylamide solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 13, pp. 1023-1036.

TAMMISHETTI, V. *et al.* Selective Flocculation of Iron Ore Slimes: Results of Successful Pilot Plant Trials at Tata Steel, Noamundi. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 70, n. 2, p. 411–419, 1 mar. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-016-1002-9> . Acesso em: 17 maio. 2023.

TRAMPUS, B. C.; FRANÇA, S. C. A.; MOURA, C. P. C. Espessamento do rejeito de minério de ferro: efeito da associação dos processos de coagulação e flocculação sobre o rejeito adensado e líquido clarificado. 2021. XII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Salvador/BA. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. Disponível em:

<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2021/II-009.pdf> . Acesso em: 05 ago. 2023.

VIEIRA, E. C. S. 2019. Compostos Naturais e Modificados na Floculação de Finos de Quartzo. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2354/1/MONOGRAFIA_CompostosNaturaisModificados.pdf . Acesso em: 25 ago. 2023.

WANG, D. *et al.* Flocculation of quartz by a dual polymer system containing tannic acid and poly(ethylene oxide): Effect of polymer chemistry and hydrodynamic conditions. Chemical Engineering Journal, v. 446, p. 137403, out. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894722028911> . Acesso em: 08 jul. 2023.