

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Marina Silva Dias

**AVALIAÇÃO DO USO DE AMIDOAMINA NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE
FERRO COM ALTO TEOR DE ALUMÍNIO**

Belo Horizonte

2024

Marina Silva Dias

AVALIAÇÃO DO USO DE AMIDOAMINA NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO COM ALTO TEOR DE ALUMÍNIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientadora: Prof(a): Dra. Andréia Bicalho Henriques

Coorientadores: Prof(a): Dra. Júnia Soares Alexandrino

Dr. Leonardo Júnior Fernandes Campos

Belo Horizonte
2024

D541a	<p>Dias, Marina Silva</p> <p>Avaliação do uso de amidoamina na flotação de minério de ferro com alto teor de alumínio [recurso eletrônico] / Marina Silva Dias. - 2024. 1 recurso online (60 f.: il., color.): pdf.</p> <p>Orientadora: Andréia Bicalho Henriques. Coorientadores: Júnia Soares Alexandrino, Leonardo Júnior Fernandes Campos.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 58-60.</p> <p>Bibliografia: f. 55-57.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Minérios de ferro - Teses. 4. Flotação - Teses. 5. Alumínio - Teses. I. Henriques, Andréia Bicalho. II. Alexandrino, Júnia Soares. III. Campos, Leonardo Júnior Fernandes IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622(043)</p>
-------	---



Ata de Defesa

A dissertação intitulada "**Avaliação do Uso de Amidoamina na Flotação de Minério de Ferro com alto teor de alumínio**", área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pela candidata **Marina Silva Dias**, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, foi aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

Andreia Bicalho Henriques Assinado de forma digital por
Andreia Bicalho Henriques
Dados: 2024.04.09 21:17:13
-03'00'

Dra. Andréia Bicalho Henriques
Orientadora (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br JUNIA SOARES ALEXANDRINO
Data: 10/04/2024 11:45:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Júnia Soares Alexandrino
Coorientadora (UEMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS
Data: 10/04/2024 15:08:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Leonardo Júnior Fernandes Campos
Coorientador (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ALBERTO PEREIRA
Data: 10/04/2024 10:55:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Carlos Alberto Pereira
(UFOP)

Documento assinado digitalmente
gov.br FERNANDO LUCIANO ALVES DE SOUZA
Data: 11/04/2024 10:46:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Fernando Luciano Alves de Souza
(UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO HENRIQUE MARTINS NUNES
Data: 01/10/2024 20:39:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 09 de abril de 2024.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade.

Aos meus pais Natalina e Eliezer, mesmo que não mais presentes fisicamente, por tudo que me ensinaram em vida e por todo amor.

À minha madrinha Marilene, pelo suporte e carinho.

Ao irmão Italo, por sempre acreditar em meu potencial.

À minha orientadora Profa. Andréia Bicalho, pela oportunidade, pelos ensinamentos, pelo cuidado e pelas orientações.

Aos meus coorientadores, Profa. Júnia Alexandrino e Dr. Leonardo Campos, por todo conhecimento compartilhado e pelos conselhos que contribuíram /substancialmente para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao Thiago e Alberto, pela parceria no laboratório de tratamento de minérios, dando/por todo apoio necessário, pelas contribuições e pela idealização do projeto.

À Talita, ao Fernando, João Vito, pela disponibilidade e ajuda nos ensaios e análises.

À Maria Aparecida, da secretaria do PPGEM, por todo o apoio e pela prontidão para resoluções das problemáticas acadêmicas.

Ao PPGEM, por todo o conhecimento e ensino de qualidade.

A todos que contribuíram para essa jornada, meu muito obrigada.

RESUMO

Este trabalho se propôs a estudar o uso da amidoamina para a flotação de um minério de ferro com um teor significativo de alumínio (>7%). O minério de ferro utilizado no estudo foi extraído da região de Santa Bárbara, Minas Gerais, no Quadrilátero Ferrífero. Definiram-se como objetivos avaliar a utilização da amidoamina na flotação de minério de ferro com alto teor de alumínio, preparar e caracterizar a amostra de ROM e realizar ensaios de flotação, utilizando a amidoamina, Flotonor 5530, com variações da dosagem dos coletores. Para alcançar esses propósitos, a metodologia incluiu as pesquisas bibliográfica, documental, qualitativa e quantitativa. Com a primeira estudaram-se e analisaram-se obras de renomados autores da área, que subsidiaram a argumentação teórica e a discussão sobre o objeto de estudo desta dissertação. Na pesquisa documental, estudaram-se documentos oficiais pertinentes ao tema. A pesquisa quantitativa baseada em números, métricas e cálculos matemáticos permitiu compilarem-se dados e, posteriormente, quantificá-los, para se proceder a análises e comparações. Por sua vez, na pesquisa qualitativa descreveram-se ideias, experiências e experimentos individuais. Os resultados apontaram não ter havido concentração do ferro, uma vez que os teores de ferro e alumínio nos produtos foram praticamente iguais. Investigaram-se aspectos como a viscosidade, a presença do mineral goethita como constituinte principal do minério em estudo e a reação da amidoamina com o NaOH, para se descrever o comportamento dos testes de flotação, e verificar o porquê de não ter ocorrido a separação do alumínio. Embora os resultados mostrassem que não houve seletividade, concluiu-se que os estudos fornecem uma base para a aplicação prática da amidoamina na flotação de minérios de ferro com alto teor de alumínio.

Palavras-chave: minério de ferro; alumínio, amidoamina; flotação.

ABSTRACT

This work aimed to study the use of amidoamine for the flotation of iron ore with a significant aluminum content (>7%). We extracted the iron ore used in the study from the Santa Bárbara region, Minas Gerais, Brazil, in the Iron Quadrangle. The objectives were to evaluate the use of amid amine in the flotation of iron ore with a high aluminum content, prepare and characterize the ROM sample and carry out flotation tests, using amidoamine, Flotisor 5530, with variations in the dosage of collectors. To achieve such purposes, the methodology included bibliographic, documentary, qualitative and quantitative research. With the first, we studied and analyzed works by renowned authors in the area, which supported the theoretical argumentation and the discussions of the object of study of this dissertation. In the documentary research, we investigated official documents relevant to the topic. Quantitative research based on numbers, metrics and mathematical calculations allowed us to compile data and, subsequently, quantified them, to carry out analyses and comparisons. In its turn, in qualitative research we described individual ideas, experiences and experiments. The results showed that there was no concentration of iron, since the iron and aluminum contents in the products were practically equal. We investigated aspects such as viscosity, the presence of the mineral goethite as the main constituent of the ore under study and the reaction of amid amine with NaOH, to describe the behavior of the flotation tests, and verify why separation of the ore did not occur. Although the results revealed that there was no selectivity, we concluded that the studies undertaken, provide bases for the practical application of amidoamine in the flotation of iron ore with high aluminum content.

Keywords: iron ore; aluminum; amid amine; flotation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Mapa geológico simplificada do Quadrilátero Ferrífero.....	15
Figura 3-2: Representação das etapas da operação da flotação.	20
Figura 3-3: Estrutura química Flotador 5530	23
Figura 4-4: Porção de amostra utilizada no estudo.....	25
Figura 4-5: Etapas da caracterização.	26
Figura 4-6: Britador de mandíbulas.....	27
Figura 4-7: Britador de rolos.	27
Figura 4-8: Amostrador de rifles.	28
Figura 4-9: Moinho de bolas.....	29
Figura 4-10: Panalytical Axyos	30
Figura 4-11: Cyclosizer	31
Figura 4-12: Fator de correção f_1	33
Figura 4-13: Fator de correção f_2	34
Figura 4-14: Fator de correção f_3	34
Figura 4-15: Fator de correção f_4	35
Figura 4-16: Difratorômetro da marca Panalytical	37
Figura 4-17: Célula de flotação Denver.....	38
Figura 4-18: Fluxograma do ensaio da flotação em bancada.	41
Figura 4-19: Viscômetro de Brookfield.....	41
Figura 5-20: Resultado do teste de viscosidade.....	50
Figura 5-21: Análise por espectrometria na faixa do infravermelho - pH 8,5.....	51
Figura 5-22: Análise por espectrometria na faixa do infravermelho - pH 10,5.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Série de peneiras.....	31
Tabela 4-2: Diâmetros de corte dos ciclones.....	32
Tabela 4-3: Condições operacionais cyclosizer.....	32
Tabela 4-4: Parâmetros para flotação em bancada.....	39
Tabela 4-5: Identificação dos testes - pH 8,5.....	39
Tabela 4-6: Identificação dos testes - pH 10,5.....	40
Tabela 5-7: Resultado fluorescência de raios X - ROM.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5-1: Curva granulométrica.....	42
Gráfico 5-2: Difractogramas por faixas granulométricas	44
Gráfico 5-3: Difractometria de raios-x por faixa granulométrica.....	44
Gráfico 5-4: Recuperação mássica e recuperação metalúrgica de Fe - pH 8,5	46
Gráfico 5-5: % de Al ₂ O ₃ para o pH 8,5	47
Gráfico 5-6: Recuperação mássica e recuperação metalúrgica de Fe - pH 10,5	48
Gráfico 5-7: % de Al ₂ O ₃ para o pH 10,5	48

LISTA DE NOTAÇÕES

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

cP - Centipoise

DRX – Difração de raio-X

Fe - Ferro

FRX – Espectrometria por fluorescência de raio-X

FTIR – Espectroscopia de infravermelho

Kg - Quilograma

μm - Micrômetro

NaOH – Hidróxido de sódio

pol - Polegadas

R – Recuperação metalúrgica

ROM – Run of mine

SiO_2 – Sílica

Y – Recuperação mássica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Minério de ferro	15
3.2 Minerais de ganga associados ao minério de ferro	16
3.3 Aspectos gerais da flotação	17
3.4 Aspectos gerais da flotação aplicada ao minério de ferro.....	21
3.5 Amidoaminas	23
3.6 Flotador 5530.....	23
4. METODOLOGIA	25
4.1 Materiais.....	26
4.2 Preparação da amostra.....	27
4.3 Caracterização	29
4.3.1 Fluorescência de raios-X amostra cabeça	29
4.3.2 Análise Granulométrica	30
4.3.3 <i>Cyclosizer</i>	31
4.3.4 Picnometria	36
4.3.5 Difractometria de raios-X	37
4.3.6 Fluorescência de Raios X (FRX).....	38
4.4 Flotação em bancada.....	38
4.4.1 Teste de viscosidade de polpa da flotação	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Caracterização da amostra do minério de ferro.....	42
5.1.1 Análise Granulométrica.....	42
5.1.2 Picnometria	43
5.1.3 Difractometria de raios X (DRX).....	43
5.1.4 Fluorescência de raios X (FRX)	45
5.1.4.1 Fluorescência de raios X (FRX) – ROM	45
5.2 Testes de flotação em bancada	45
6. CONCLUSÕES	54
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE	59

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é uma *commodity* mineral de suma importância para a indústria. A disponibilidade do minério de ferro e o seu valor impactam significativamente o setor industrial e na economia.

Para a obtenção de um minério de ferro de qualidade para a indústria, esse deve ser submetido a operações unitárias de tratamento de minérios. Essas operações são a cominuição, o peneiramento, a classificação, concentração, filtragem etc. Todas essas operações são de suma importância, mas vale destacar a etapa de concentração.

A concentração tem como objetivo aumentar o teor do mineral de interesse. Diferentes técnicas são aplicadas para essa finalidade, sendo elas a concentração densitária, concentração magnética e a flotação, dando foco à flotação, processo que se baseia na diferença das propriedades físico-químicas, das superfícies dos minerais.

Na flotação dos minerais, são empregados reagentes, fundamentais para a *performance* da operação unitária, e, portanto, também para o minério de ferro. Na flotação de ferro, comumente empregam-se eteraminas e amido. As eteraminas amplamente utilizadas são as éter diaminas e as éter monoaminas. Como reagentes depressores, o amido é bastante utilizado, e sua função consiste em suprimir a flotação de alguns minerais indesejados, o amido forma complexos com íons metálicos e minerais contaminantes, evitando, desse modo, que haja adesão às bolhas de ar, melhorando a seletividade do método (Araújo *et al.*, 2009).

Para garantir a seletividade do método de flotação, além de estudos sobre custo-benefício relacionados aos reagentes, pesquisas têm sido realizadas buscando novos reagentes. Nesse contexto, surgem as amidoaminas.

As amidoaminas são reagentes obtidos por meio da reação de poliamidas com ácidos orgânicos e fornecem como vantagens à operação de flotação, a seletividade e a redução de custos, uma vez que, coletor e depressor são um único reagente. A amidoamina atua como um coletor, ou seja, ajuda a aderir as partículas de minério de ferro e as torna mais hidrofóbicas, permitindo que elas sejam separadas das impurezas presentes na água. Isso facilita a formação de uma espuma que contém as partículas de minério de ferro, que são então coletadas e removidas do processo.

Nesse sentido, e explorando as pesquisas referentes às amidoaminas, notada sua eficiência para a flotação de minério de ferro com teores elevados de sílica, e apontando a relevância de se compreender o comportamento da amidoamina, este trabalho se propôs a empregar a amidoamina para a concentração do ferro, em amostras minerais com alto teor de alumínio. Nesse sentido, esta pesquisa propõe sugerir uma nova perspectiva para o tratamento de minérios, na operação unitária de flotação, tangendo o campo dos reagentes.

No intuito de avaliar a eficácia desta pesquisa, posteriormente à caracterização mineral, foram realizados estudos de concentração por meio de testes em bancada, utilizando a flotação. As amostras de minério de ferro foram extraídas de rochas da região Leste de Santa Bárbara (MG). A eficiência do processo de flotação foi avaliada, baseando-se nos teores de ferro para o tratamento de minérios, na operação unitária de flotação.

2. OBJETIVOS

Isso posto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a utilização da amidoamina na flotação de minério de ferro com alto teor de alumínio. Para atingir tal propósito, definiram-se como objetivos específicos: preparar e caracterizar a amostra de ROM e realizar ensaios de flotação, utilizando a amidoamina Flotisor 5530, com variações da dosagem dos coletores.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de ferro

O minério de ferro é amplamente explorado e comercializado, sendo extensivamente empregado na indústria da siderurgia, como matéria-prima fundamental para a constituição do aço.

Os minérios de ferro viáveis para a exploração são os das classes dos óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Esse agrupamento por classes é devido à composição química desses elementos. Ressalta-se, também, que a classe dos silicatos tem menor expressão econômica que as outras classes (Chemale; Takehara, 2013).

Como locais de grandes reservas de minério de ferro no Brasil, destaca-se a província mineral Serra de Carajás, no estado do Pará e a província mineral do Quadrilátero Ferrífero, sendo que nesse último encontra-se a região onde a mina lócus desta pesquisa localiza.

O Quadrilátero Ferrífero é uma importante reserva de minério de ferro existente no estado de Minas Gerais, Brasil. Essa região abrange cerca de 8000 km², abrangendo a área entre Belo Horizonte, Santa Bárbara, Congonhas e Mariana (Chemale; Takehara, 2013). A Figura 3-1, a seguir, ilustra o mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

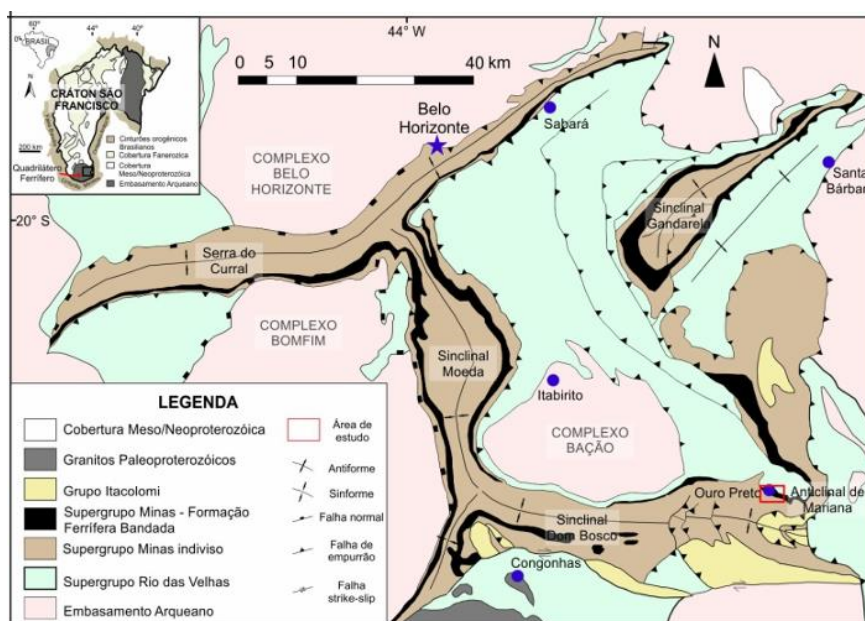


Figura 3-1: Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero

Fonte: Farina *et al.*, 2015

A gênese do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero é marcada por três grandes eventos orogenéticos. O primeiro se caracteriza pelo retrabalhamento crustal e magnetismo juvenil, em 2,78 Ga a 2,70 Ga (Chemale *et al.*; 1991). O evento posterior também é um retrabalhamento, Ciclo Transamazônico, em 2,1 Ga a 2,0 Ga, em que as rochas do Supergrupo Minas foram afetadas (Teixeira *et al.*, 1995) e, finalmente, o Ciclo Brasileiro marcado por cavalgamento de cinturões e dobramentos, no período de 0,65 Ga a 0,5 Ga (Chemale *et al.*, 1991).

Os minérios de ferro explorados no Quadrilátero podem ser divididos em dois grupos, o itabirítico e de alto teor, classificados de acordo a mineralogia e textura (Rosière *et al.*, 1993).

Os minérios itabiríticos possuem alternância de bandas formadas por óxidos de ferro e minerais transparentes, com teores de ferro variando entre 20% a 55%. Os itabiritos podem ser friáveis, pulverulentos ou compactos, sendo esses últimos os mais ricos. No que tange à composição, os itabiritos podem ser classificados como: I) itabirito comum - constituído por bandas ricas em quartzo e óxidos de ferro; II) itabirito dolomítico – caracterizado por bandas ricas em carbonatos e óxidos de ferro; III) itabirito anfibolítico – composto por bandas com anfibólios e óxidos de ferro; IV) itabiritos manganíferos e filíticos – encontrados nas interfaces entre carbonatos e filitos. (Rosière *et al.*, 1993).

Os minérios de ferro de alto teor são constituídos basicamente por hematita, e são encontrados em proporções variadas, podendo ser em lentes, dentro das camadas de itabirito. Esses minérios, podem ser encontrados na forma compacta, apresentando-se maciços, bandados e/ou laminados, foliados, lineados e brechados. Outra forma de serem encontrados é como minério de alto teor pulverulento, podendo ser foliado e/ou lineado e granular. A última forma é como *blue-dust*, no qual não há estrutura interna (Rosière *et al.*, 1993).

3.2 Minerais de ganga associados ao minério de ferro

Os chamados minerais de ganga são aqueles que não possuem valor econômico agregado. No minério de ferro, apresentam-se como ganga do minério de ferro, os seguintes minerais: quartzo (SiO_2), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), a caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e minerais da

classe dos anfibólios (Chemale; Takehara, 2013). Os minerais de ganga podem ser considerados contaminantes do minério de ferro, e, por isto, devem ser realizadas operações de tratamento para a retirada e/ou diminuição da concentração desses contaminantes. Os minerais de ganga contêm elementos que, dependendo da quantidade acumulada no minério de ferro, interferem, por exemplo, nos processos da indústria siderúrgica. Exemplos desses elementos são a sílica, o fósforo e alumínio.

Tendo em vista o foco desta pesquisa, uma atenção especial deve ser dada ao alumínio. Uma concentração elevada de alumínio no minério de ferro pode comprometer a qualidade do aço produzido a partir desse minério, resultando em produtos finais com baixa ductibilidade e frágeis.

No processo de fusão, o alumínio interfere na viscosidade da escória, dificultando o processo de controle de variáveis metalúrgicas (Costa *et al.*, 2010). A presença elevada de alumínio em minérios de ferro pode exigir aplicações de técnicas especiais de tratamento de minérios, como por exemplo, a dos reagentes especiais na etapa de flotação, tais como novos coletores, depressores, amidoaminas etc.

De acordo com Costa *et al.*, (2010. *apud* Stanjek, H.; Shwertmann, U, 1992), uma questão relevante que tange à indústria se relaciona à possível remoção de alumínio durante as etapas de concentração do minério de ferro. Outrossim, além do alumínio estar presente em óxidos e hidróxidos de alumínio ou em silicatos, ainda há a possibilidade de que o alumínio substitua, isomorficamente, o ferro na estrutura da hematita e também da goethita.

3.3 Aspectos gerais da flotação

Baltar (2021) descreve que a operação de flotação começou a ser desenvolvida em 1860, quando o inglês Willians Haynes apresentou um processo para a separação de minerais de ganga de sulfetos. Em 1877, os irmãos Bessel empregaram a flotação para concentrar grafita. No começo do século XX, em 1905, houve um grande avanço, que foi a substituição de óleos por bolhas de ar geradas a partir de ácidos sobre carbonatos.

Pouco tempo depois dessa descoberta, deslindou-se que era possível gerar as bolhas de ar através do vácuo, mas, posteriormente, constatou-se que essa aeração a vácuo não era

aplicável à escala industrial. Assim, um avanço mais significativo se daria em 1909, quando um processo de aeração produzido por um impelidor foi patenteado. Na sequência, histórica, em 1911, a primeira usina de flotação foi instalada em Montana, nos Estados Unidos, e seu objetivo era recuperar finos de esfalerita.

Ainda, consoante Baltar (2021), em 1921, houve a popularização da operação unitária de flotação, devido à patente que introduziu o coletor no processo, possibilitando que minerais de natureza hidrofílica pudessem se tornar hidrofóbicos, por meio de compostos orgânicos. No Brasil, a flotação começou a ser utilizada na década de 1950 para concentrar chumbo.

Em 1962, foi registrada a primeira patente da flotação de coluna, instalada no Canadá, para a flotação de molibdenita. O uso da flotação para a concentração mineral é considerado o avanço mais importante da tecnologia mineral.

A flotação pode ser entendida como uma operação de tratamento de minérios baseada na propriedade diferenciadora das características das superfícies das espécies presentes no meio. A flotação explora as propriedades das interfaces (Peres; Araújo, 2009). Além disso, a seletividade da flotação é caracterizada pela diferença de grau de hidrofobicidade, que seria a molhabilidade da partícula pela água.

Quando uma partícula é hidrofóbica, ela tem fobia, aversão pela água, e, em contrapartida, quando ela é hidrofílica, ou seja, possui afinidade com a água, e, por isso a absorve facilmente, e pode ser também aerófila, amante do ar.

A interface envolvida no processo de flotação é a sólido-líquida. Conforme denota Baltar (2021), a região existente entre a superfície mineral (sólido) e a superfície da água (líquido), possibilita a ocorrência dos fenômenos cruciais para a flotação, sendo eles a formação da Dupla Camada Elétrica, provocando o desbalanceamento da carga elétrica da superfície do mineral (hidrofílica) em contato com a água, o outro fenômeno, baseado na adsorção dos reagentes, permitindo que haja a diminuição da energia do sistema.

Na flotação, para a seletividade da operação, é necessário incluir substâncias orgânicas e inorgânicas, denominadas reagentes, as quais são responsáveis por atuarem na superfície dos minerais contidos na polpa. Os reagentes podem induzir a propriedade diferenciadora nos minerais, por exemplo, transformar um mineral hidrofílico em hidrofóbico (Peres; Araújo, 2009). É importante salientar que os reagentes têm como finalidade controlar as

características das interfaces, e são divididos em: coletores, espumantes e modificadores.

Os reagentes coletores caracterizam-se por terem uma parte de sua molécula apolar e orgânica e a outra polar e inorgânica. A parte polar tem como função interagir com a superfície do mineral, com o intuito de possibilitar a adsorção; essa polaridade é responsável pela seletividade e pelas ligações com a superfície dos minerais. Quanto à parte apolar, parte hidrofóbica, ela tem uma cadeia hidrocarbônica cuja função é permitir a hidrofobicidade da superfície (Baltar, 2021).

Outra classe de reagentes são os espumantes, que têm como funcionalidade reduzir a tensão superficial, possibilitando a formação de espuma estável, a de reduzir a velocidade do movimento das bolhas, e a de permitir a adesão partícula-bolha e fortalecimento da membrana interfacial. Além disso, a qualidade dos reagentes espumantes se posta em eles não terem características de coletores, formarem bolhas estáveis, serem insensíveis à variação de pH, serem de baixo custo e terem disponibilidade no mercado (Baltar, 2001).

Há também a classe dos modificadores, reagentes que se caracterizam por melhorar a seletividade e recuperação durante o processo. Esses modificadores podem ser orgânicos e inorgânicos, inibe a ação de um coletor sobre a superfície mineral, ajuste do pH, dispersão, entre outros (Baltar, 2021). Os reagentes modificadores podem ser divididos de acordo com o papel que desempenham, podendo ser os de: depressores, ativadores, reguladores de pH e de dispersantes, por exemplo.

Quando os depressores são modificadores, eles atuam na seletividade do processo, possibilitando o aumento do teor do elemento útil no concentrado. O depressor inibe a adsorção do coletor, impedindo a hidrofobização das superfícies que não devem ser flotadas. Atuando com ativadores, eles têm a funcionalidade de aumentar a intensidade, a adsorção do coletor sobre o mineral a ser flotado, podendo agir diretamente na superfície mineral, na interligação entre a superfície mineral e no coletor, e, por fim, na incorporação de íons ((Baltar, 2021; Peres; Araújo, 2009).

No caso dos reguladores de pH, eles têm a função de adequar o pH do sistema de flotação, no intuito de tornar a operação unitária mais eficiente. Quando se fala dos dispersantes, eles se apresentam como “individualizadores” de partículas, ou seja, separam as partículas para posterior concentração (Baltar, 2021).

Referente aos equipamentos empregados na flotação, há tanques, sendo cada um

denominado célula de flotação, e são alimentados continuamente pela polpa mineral. A máquina de flotação é instalada dentro desses tanques e na qual há um rotor cuja finalidade é executar a agitação da polpa, e, conseqüentemente, mantê-la em suspensão; há ainda um complemento chamado estator que tem como função fragmentar as bolhas de ar. (Chaves; I. Filho; Braga, 2010).

Nas etapas de concentração, segundo Chaves et. al (2010), muitas vezes, não é possível obter uma recuperação satisfatória em apenas uma etapa, assim, faz-se necessária a combinação de etapas subsequentes, para atingir a performance planejada. No caso da flotação, apresentada anteriormente também esse procedimento é aplicado. Inicialmente, é executada uma primeira flotação, denominada *rougher*, em que se obtém um concentrado pobre e um rejeito que ainda contém teores dos minerais úteis. Desse concentrado precisa-se remover as impurezas, limpá-lo e, a seguir, ele é direcionado à segunda etapa chamada de *cleaner*, originando o concentrado final e um rejeito de teor elevado. O rejeito *rougher* é reprocessado numa outra etapa de flotação, a *scavenger*, na qual é obtido o rejeito final de baixo teor e um concentrado que reúne os minerais úteis que estavam no rejeito *rougher*, mas que tem um baixo teor para ser considerado produto final. O rejeito do *cleaner* e o concentrado *scavenger*, por ainda possuírem minerais úteis, retornam para a etapa *rougher*.

Na Figura 3-2, na sequência, as etapas da operação flotação.

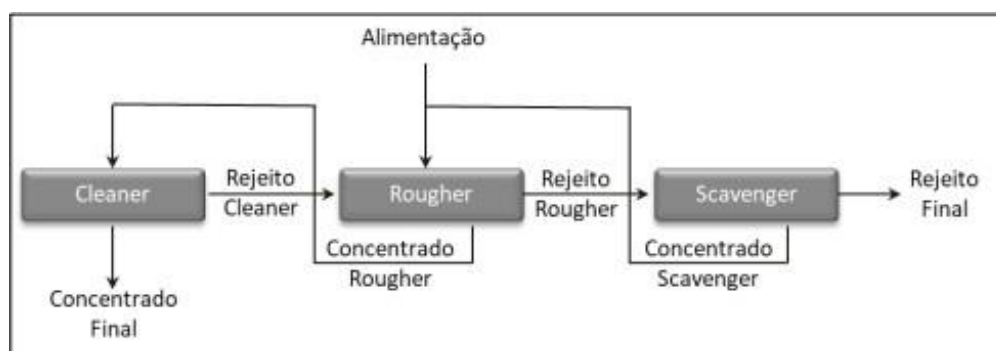


Figura 3-2: Representação das etapas da operação da flotação.

Fonte: Chaves *et. al.*, (2010).

Na operação de flotação, uma variável imprescindível no processo é o Potencial Zeta. Segundo Baltar (2021), este Potencial pode ser entendido como um potencial

eletrocínético, ou seja, surge a partir do movimento de cargas elétricas. O Potencial Zeta está relacionado às propriedades elétricas das partículas e das bolhas de ar na suspensão e é uma medida da carga elétrica na interface das partículas e das bolhas, influenciando a interação eletrostática entre elas.

Na flotação de minério de ferro, por exemplo, o potencial zeta das partículas e das bolhas pode afetar a adsorção de reagentes, a aderência das partículas às bolhas e a formação de aglomerados.

Geralmente, um alto potencial zeta indica uma forte repulsão eletrostática entre as partículas, o que pode dificultar a aglomeração e a aderência das partículas às bolhas. Isso pode ser vantajoso em certos casos, pois ajuda a evitar a formação de aglomerados indesejados. Por outro lado, um potencial zeta menor pode permitir que as partículas se aproximem umas das outras e se liguem mais facilmente às bolhas, promovendo a formação de aglomerados e melhorando a eficácia da flotação. Portanto, o controle do potencial zeta é matéria de consideração importante no projeto e na operação de sistemas de flotação.

Vale ressaltar que o potencial zeta é influenciado por fatores como o pH da suspensão, a composição dos reagentes e as características das partículas. O conhecimento sobre o potencial zeta pode ajudar os engenheiros de processos a ajustar as condições de operação, para otimizar a eficiência da flotação, maximizando a recuperação e o grau do concentrado desejado, processos cujos aspectos serão delineados, a seguir.

3.4 Aspectos gerais da flotação aplicada ao minério de ferro.

A flotação para o minério de ferro é usada para separar minerais indesejados da hematita ou magnetita, que são minerais de ferro. Bolhas de ar são introduzidas na suspensão de minério moído, e os minerais de ferro se aderem às bolhas, enquanto os não ferrosos permanecem na solução. Isso permite a separação eficaz dos minerais e a concentração do minério de ferro.

Para a flotação de minério de ferro, apresentam-se diferentes rotas de flotação, quando o mineral de ganga é o quartzo, sendo elas: flotação catiônica reversa de quartzo, flotação aniônica direta de óxidos de ferro e flotação aniônica reversa de quartzo ativado.

Majoritariamente, a flotação catiônica reversa é o método de flotação mais difundido no Brasil. Nesse modelo de flotação, o quartzo (mineral de ganga) é flotado, geralmente, empregando-se coletores catiônicos e a hematita é deprimida, utilizando-se amidos não modificados. Referente ao pH, a flotação catiônica ocorre na faixa de 9,5 e 10,5 (Araujo *et al.*, 2009).

As aminas são os coletores catiônicos empregados na flotação reversa de minério de ferro. Esses coletores são produzidos a partir de gorduras e óleos, que, geralmente, possuem cadeias carbônicas extensas, de 8 a 22 carbonos em sua composição (Bulatovic, 2007).

Sobre os depressores, na flotação reversa de minério de ferro, eles atuam deprimindo os minerais de hematita. Os amidos mais utilizados são os de milho, sendo estes compostos estruturalmente por amilose e amilopectina (Araujo *et al.*, 2009). Os amidos são insolúveis em água fria, devido à adesão de suas cadeias e, para ser empregado na flotação, o amido deve ser preparado de forma a aumentar sua solubilidade na polpa mineral. A solubilidade pode ser atingida com a utilização do aquecimento da solução de amido, ou pela adição de soda cáustica. Nas usinas atuais, o método de preparo mais difundido é a gelatinização com NaOH (Pearse, 2005).

Já a flotação aniônica direta apresenta-se como uma boa alternativa para a concentração de minérios de ferro de baixos teores. A flotação aniônica foi bastante empregada no passado, quando as aminas não eram ainda utilizadas no tratamento mineral (Araujo *et al.*, 2009).

A seletividade na flotação aniônica reversa é obtida em faixa de pH básica, geralmente acima de 11, com o uso de cátions de cálcio na solução. Nesta faixa de pH, os íons de cálcio trabalham como íons determinadores de potencial de segunda ordem, mudando a carga superficial do quartzo de negativa para positiva. Os ácidos graxos, na maioria dos casos, são utilizados como coletores aniônicos (Ma, 2012; Ferreira, 2015).

A flotação de minério de ferro é empregada com as seguintes finalidades: i) concentrar minérios de ferro não magnéticos pela flotação da sílica (flotação reversa) ou da hematita (flotação direta); ii) remover da sílica abaixo de 0,044mm dos concentrados magnéticos. iii) preparar superconcentrados para a redução direta e iv) reduzir impurezas, tais como sílica, alumina, fósforo, entre outros.

3.5 Amidoaminas

A amidoamina é um composto químico que possui grupos funcionais de amida e amina em sua estrutura. Ela pode ser utilizada em diversas aplicações, incluindo em processos de flotação mineral.

Na indústria de mineração, a amidoamina é frequentemente usada como um reagente de flotação para ajudar a separar minerais valiosos de minerais indesejados. Ela atua adsorvendo, na superfície dos minerais a serem separados, alterando suas características de superfície, e permitindo que bolhas de ar se prendam a esses minerais, fazendo com que eles subam à superfície da suspensão. Isso resulta na formação de uma espuma contendo os minerais de interesse, que pode ser coletada e separada dos minerais não desejados.

A amidoamina desempenha um papel importante na otimização dos processos de separação mineral, visando a maximizar a recuperação dos minerais valiosos de forma eficiente.

As amidoaminas são reagentes obtidos pela reação entre poliaminas e ácidos orgânicos. As amidoaminas são reagentes que vem sendo estudados para o desenvolvimento de processos eficientes de flotação de lama de minério de ferro (Silva *et al.*, 2021).

3.6 Flotisor 5530

O reagente Flotisor 5530 da Clariant é uma amidoamina que pode ser quimicamente denominado N-[3-(dimetilamina)propil]dodecanamida. A estrutura do reagente é apresentada na Figura 3-3, a seguir.

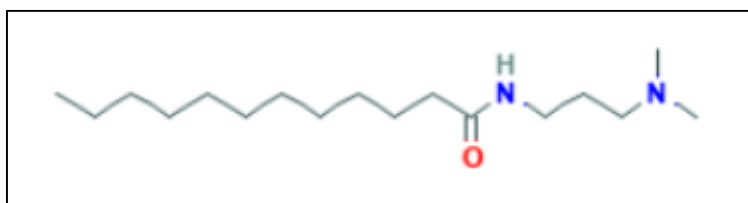


Figura 3-3: Estrutura química Flotisor 5530

Fonte: Vieira *et.al.*, 2021

De acordo com estudos realizados por Matiolo *et al.* (2020), utilizando o Flotisor 5530, na flotação de lamas de minério de ferro, o material usado naquelas pesquisas, a alimentação detinha 45,2 % de Fe e 28,6 % de SiO₂. Para a flotação realizada no estudo, a concentração do reagente foi de 200 g/t, e o pH da polpa foi de 10,5. A partir das condições citadas para a realização dos testes (concentração e pH) obteve-se um concentrado com 62,3% de Fe, SiO₂ de 3,3% e uma recuperação metálica de 93,2%, demonstrando a eficiência do reagente em questão.

Ainda, para comparar os resultados obtidos nos testes, Matiolo *et al.*, (2020), realizou testes inserindo amido como depressor, obtendo um concentrado de 62,5% de Fe e 4,7 % de SiO₂, mostrando, dessa forma, que a amidoamina não necessita da ação de um depressor. Além disso, com os resultados apresentados no estudo, ficou óbvio que a amidoamina Flotisor 5530 era um reagente competitivo, isto é, houve ganhos no processo.

Um estudo fundamental foi realizado por Silva *et al.*,(2021) com moléculas de amidoamina (Flotisor 5530), na qual se observou uma elevada seletividade medida por meio do ângulo de contato e da realização de testes de flotação em bancada. Ademais, comparando a amidoamina com coletores catiônicos convencionais, como a eteramina, o aumento do grupo polar, possibilita uma adsorção, confirmada por meio de testes de infravermelho realizados no estudo, mais seletiva nos minerais silicatos.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, a metodologia incluiu as pesquisas bibliográfica, documental e qualitativa e quantitativa. Com a primeira estudaram-se e analisaram-se obras de renomados autores da área, que subsidiaram discorrer e discutir o objeto de estudo desta dissertação. Na pesquisa documental, estudaram-se documentos oficiais pertinentes ao tema. A pesquisa quantitativa baseada em números, métricas e cálculos matemáticos permitiu compilaram-se dados e posteriormente quantificá-los, para se proceder a comparações. Por sua vez, na pesquisa qualitativa os resultados não mostram números concretos, mas ideias e experiências individuais. Ela auxilia a análise dos dados. (Pesquisa Qualitativa e Quantitativa: Diferenças e Como Fazê-las. Neil Patel. Disponível em: <https://neilpatel.com> › blog › pesquisa-qualitativa-e-quant...).

Para desenvolver esta pesquisa, utilizaram-se as amostras de uma mina de minério de ferro, na região de Santa Bárbara, Minas Gerais, Brasil.

Na sequência, a Figura 4-4 ilustra uma porção da amostra utilizada no estudo.



Figura 4-4: Porção de amostra utilizada no estudo.

Fonte: Elaboração própria.

Para a obtenção dos resultados, a pesquisa seguiu etapas e procedimentos detalhados nas seções, a seguir. Antes disso, apresentamos a Figura 4-5, que sintetiza as etapas realizadas no estudo.

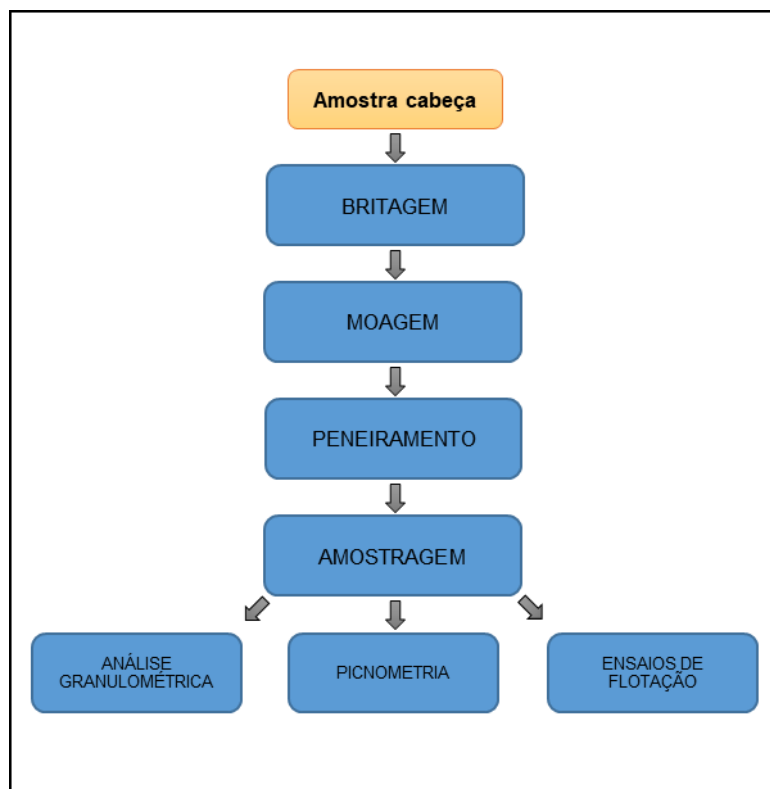


Figura 4-5: Etapas da caracterização.

Fonte: Elaboração própria.

Na sequência, apresenta-se a descrição dos passos seguidos para desenvolver esta investigação.

4.1 Materiais

Os materiais empregados no estudo foram: a) a amostra de minério de ferro e b) a amidoamina – Flotisor 5530; fornecida pela Clariant.

4.2 Preparação da amostra

No intuito de concretizar os objetivos do trabalho, a amostra de minério foi inicialmente amostrada, obtendo-se uma alíquota de, aproximadamente, 25 kg, amostra . A amostra foi britada no britador de mandíbulas ilustrado na Figura 4-6, e, posteriormente, britada no britador de rolos, conforme evidenciado na Figura 4-7.



Figura 4-6: Britador de mandíbulas.

Fonte: Elaboração própria.



Figura 4-7: Britador de rolos.

Fonte: Elaboração própria.

Com essa amostra cominuída, ela foi submetida ao amostrador de rifles, conforme Figura 4-8, obtendo-se duas alíquotas.



Figura 4-8: Amostrador de rifles.

Fonte: Elaboração própria.

Uma das alíquotas, com cerca de 12 kg, foi submetida ao peneiramento, método de de separação partículas a úmido, para o qual se utilizou a peneira de 150 μm . O material passante na peneira de 150 μm alimentou a moagem, como se pode ver na Figura 4-9, na sequência.

O moinho utilizado possui dimensões de 8 pol x 8 pol, e, como corpos moedores, empregaram-se as bolas, sendo utilizada uma carga de aproximadamente 10 kg, com dimensões variando entre 1 pol e $\frac{1}{2}$ pol. A velocidade de totação do moinho foi de 60 rpm e o tempo de moagem utilizado foram cerca de 10 minutos. Para as moagens, a alimentação foi de, aproximadamente, 1,5 kg de material.



Figura 4-9: Moinho de bolas

Fonte: Elaboração própria.

O produto da moagem foi colocado em baldes para sedimentação. Posteriormente, a água foi sifonada e o material desaguado foi submetido à secagem na chapa a 100° C. Com as amostras já secas, foi necessário realizar a desaglomeração, e, assim, submetê-la à amostragem para início da caracterização.

4.3 Caracterização

Com o objetivo de se ter um conhecimento das principais características, bem como, das principais propriedades dos materiais empregados nesse trabalho, realizou-se a caracterização tecnológica. Os testes realizados foram a fluorescência de raios-X (FRX) da amostra cabeça, a análise granulométrica, picnometria, fluorescência de raios-X por faixa granulométrica e difratometria de raios-X (DRX).

4.3.1 Fluorescência de raios-X amostra cabeça

A composição química da amostra de minério de ferro em estudo foi obtida por meio da análise de espectrometria de fluorescência de raios-x, utilizando o Panalytical Axyos, equipamento ilustrado na Figura 4-10.



Figura 4-10: Panalytical Axyos

Fonte: Bimedis, 2024

As amostras foram pulverizadas. O equipamento usa um tubo de raios-X que irradia a amostra com raios-x de alta energia que excitam os elétrons presentes nos átomos da amostra, fazendo-os mover para níveis de energia mais elevados. Quando os elétrons excitados retornam aos seus níveis de energia originais, eles emitem energia na forma de raios-X fluorescentes característicos, sendo esses únicos para cada elemento presente na amostra. Logo, o equipamento capta os raios-X emitidos, identificando e quantificando os elementos presentes nas amostras.

4.3.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada em duas etapas, sendo a primeira com o peneiramento a úmido e a segunda, a seco. Em ambas as etapas se utilizaram, do peneirador vibratório suspenso, peneiras de 20 cm de diâmetro, da série de Tyler.

Para o peneiramento a úmido, empregou-se uma peneira de 38 μm , para separar as partículas com tamanhos inferiores a 38 μm . O tempo de peneiramento nessa etapa foi de cerca de 10 minutos e a vazão de água de 1 L/min. O *oversize* (material retido) de 38 μm , foi submetido à secagem para dar condições à etapa subsequente, o peneiramento a seco.

As peneiras empregadas nessa etapa secundária seguem apresentadas na Tabela 4-1. O

tempo de peneiramento a seco foi de 30 minutos.

Tabela 4-1: Série de peneiras

MESH	ABERTURA - μm
100	150
150	106
200	75
270	53
325	45
400	38

Fonte: Elaboração própria.

4.3.3 Cyclosizer

O *cyclosizer* é um equipamento usado na indústria de mineração e no processamento mineral, que classifica e separa partículas sólidas em uma amostra com base em seu tamanho e densidade. É empregado para a determinação da distribuição granulométrica de amostras com tamanhos menores que 38 μm . É constituído por uma série de hidrociclones invertidos, conectados em série. A Figura 4-11 em seguida ilustra esse equipamento.



Figura 4-11: Cyclosizer

Fonte: Elaboração própria.

Conforme descrito por Wills (1988), o formato de cada hidrociclone favorece a classificação, em virtude dos diâmetros decrescentes na tubulação de entrada (alimentação) e de saída (vortex) na direção do fluxo. Logo, por meio da redução dos diâmetros, aumentam-se as velocidades da suspensão, e forças centrífugas têm suas intensidades elevadas no interior dos hidrociclones, ocorrendo dessa forma uma diminuição do tamanho limite de separação das partículas.

O *Cyclosizer* é planejado com os diâmetros de corte para cada ciclone, como descritos na Tabela 4-2, contanto que sejam respeitadas as condições operacionais apresentadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-2: Diâmetros de corte dos ciclones

CICLONE	TAMANHO LIMITE (µm)
1	42,7
2	30,5
3	22,1
4	15,0
5	12,0

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4-3: Condições operacionais cyclosizer

VARIÁVEL	VALOR PADRÃO	UNIDADE
Vazão de água	696	L/h
Temperatura da água	20	°C
Densidade da amostra	2,65	g/cm ³
Tempo de elutriação	Infinito	-

Fonte: Elaboração própria.

Quando os valores obtidos durante os ensaios no Cyclosizer não correspondem aos valores padrões, devem ser aplicados fatores de correção, conforme a Equação 1:

$$d_e = d_l \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \quad 1)$$

Em que:

d_e = Tamanho efetivo de separação;

d_l = Tamanho limite de separação;

f_1 = Fator de correção para a temperatura;

f_2 = Fator de correção para a densidade;

f_3 = Fator de correção para a vazão;

f_4 = Fator de correção para o tempo de elutriação.

As Figuras de 4-12 a 4-15, a seguir, apresentam os gráficos utilizados para a obtenção dos fatores f_1 , f_2 , f_3 , f_4 .

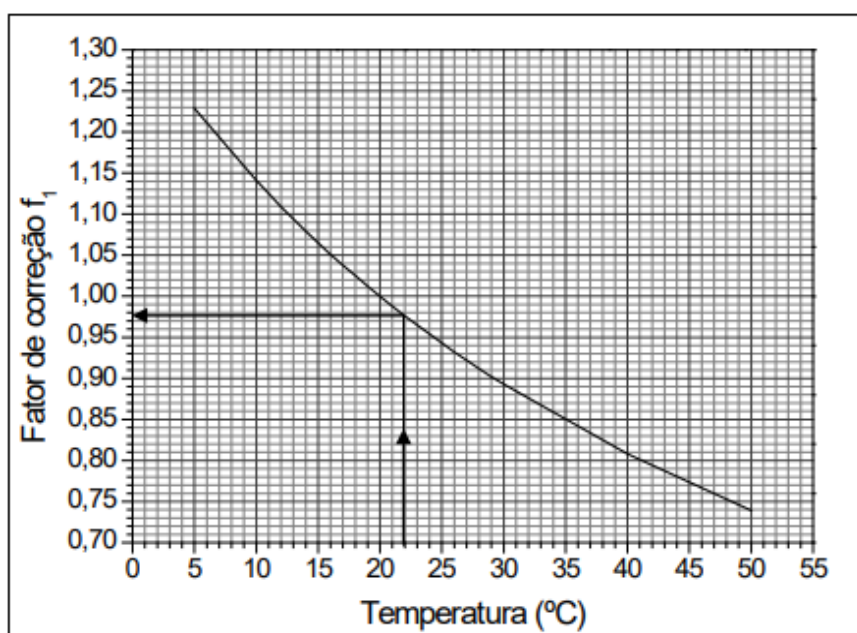


Figura 4-12: Fator de correção f_1

Fonte: Braga *et al.*, 2007

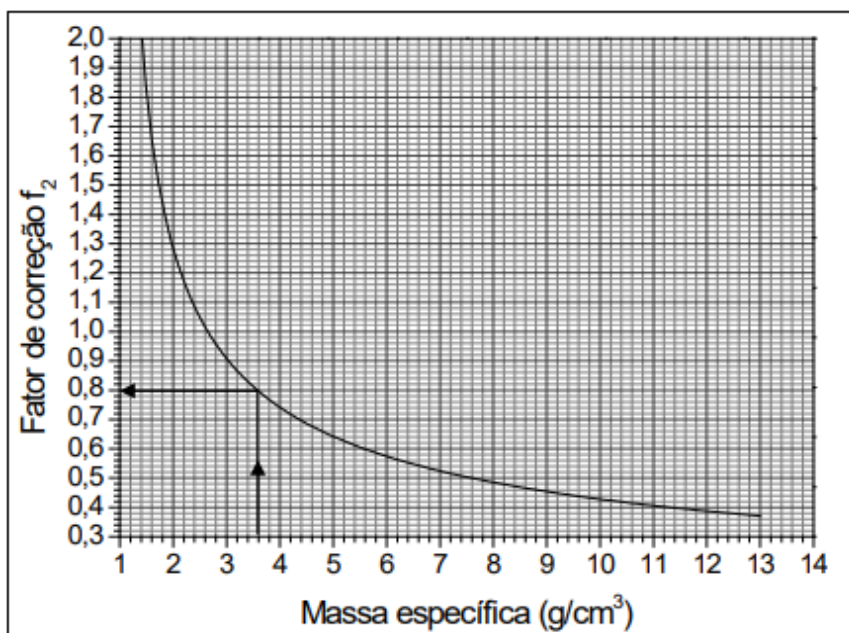


Figura 4-13: Fator de correção f_2

Fonte: Braga *et al.*, 2007

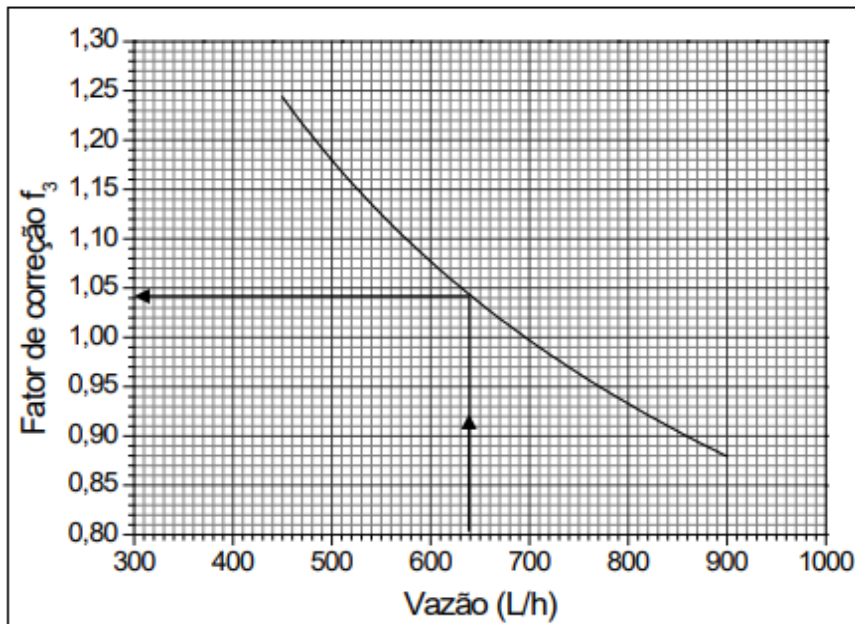


Figura 4-14: Fator de correção f_3

Fonte: Braga *et al.*, 2007

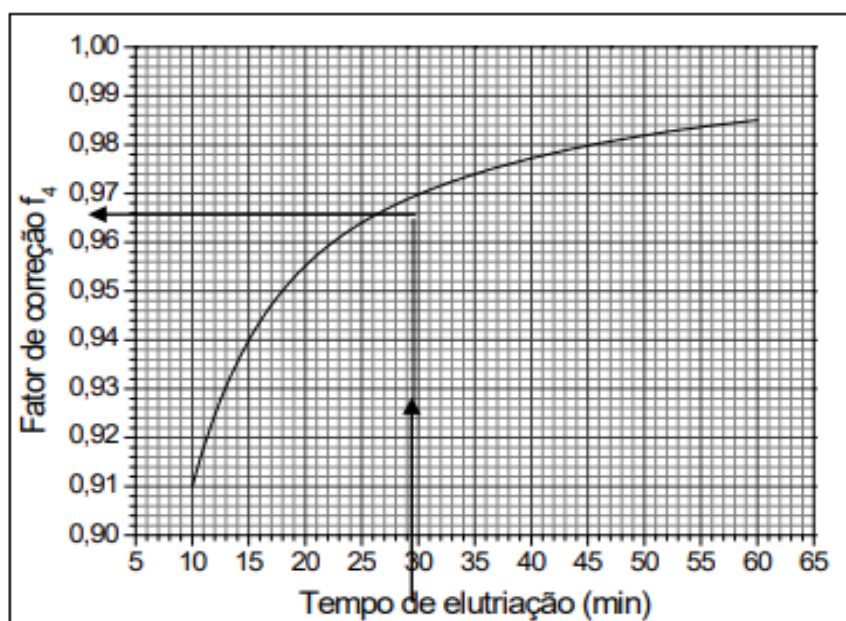


Figura 4-15: Fator de correção f_4

Fonte: Braga *et al.*, 2007

O equipamento é alimentado com massa de cerca de 50g, . Essa massa precisa ser diluída e o seu pH ajustado para 10,5, garantindo dessa forma a dispersão das partículas. Posteriormente, a polpa é adicionada, cuidadosamente, ao recipiente de alimentação do *cyclosizer*, para que não haja perda de massa. Em seguida,o recipiente de alimentação é acoplado ao *cyclosizer* e são fechadas as válvulas de controle e de ápex dos 5 ciclones do equipamento.

Logo após, o equipamento é ligado, e logo se ajusta a vazão de água para o valor padrão e retira-se o vórtex de ar que é formado em cada um dos ciclones, através da abertura da válvula do ápex e de seu posterior fechamento. Em seguida, a válvula de alimentação da amostra é aberta e a contagem do tempo de elutriação é iniciada, a partir do momento em que o recipiente de alimentação se encontra completamente transparente, sem partícula alguma no interior.

Após a finalização do teste, os materiais são recolhidos pela válvula do ápex e colocados em um funil com um filtro de papel para filtragem. Após a filtragem (escoamento da água), os filtros de papel são levados à uma estufa para secagem. Ressalta-se que os filtros, antes que os materiais sejam colocados, são pesados, limpos, e as massas retidas

em cada ciclone são determinadas pela diferença entre a massa do filtro após a secagem, e a massa inicial do filtro seco.

4.3.4 Picnometria

Com o objetivo de obter a densidade do minério em estudo, empregou-se a picnometria, entendida como uma técnica utilizada para determinar, com alta precisão, a densidade de sólidos e líquidos.

O método consiste em utilizar o picnômetro, descrito como um balão de vidro que possui fundo chato, e uma rolha, também de vidro, através da qual se introduz e se passa um capilar.

Os passos da picnometria incluem, inicialmente, pesar o picnômetro vazio, limpo e seco, e utilizando-se três casas decimais. Em seguida, o minério é colocado dentro do picnômetro, ocupando cerca de um terço do volume do recipiente, logo, faz-se uma nova pesagem incluindo o peso de picnômetro mais a amostra de minério. Posteriormente, completa-se o picnômetro com a água, de modo que ela transborde pelo capilar, e, depois, realiza-se uma nova pesagem, pesando-se o picnômetro mais a amostra e a água. Terminado esse processo, o picnômetro é pesado somente contendo água em seu interior. Com a obtenção dessas quatro massas descritas, utiliza-se a Equação 2 para obter a densidade.

$$d = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (2)$$

Em que:

D= densidade da amostra;

m_1 = massa do picnômetro vazio;

m_2 = massa do picnômetro + amostra;

m_3 = massa do picnômetro + amostra + água;

m_4 = massa do picnômetro + água;

$m_2 - m_1 =$ massa da amostra;

$m_4 - m_1 =$ volume total do picnômetro;

$m_3 - m_2 =$ volume do picnômetro não ocupado pela amostra.

4.3.5 Difractometria de raios-X

A difratometria de raios-X busca determinar a composição mineralógica da amostra analisada.

O equipamento utilizado para a pesquisa foi o difratômetro da marca *Panalytical*, modelo *EMPYREAN*, no qual o tubo é constituído de anodo de cobre, conforme a Figura 4-16. As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Minas, da Universidade Federal de Minas Gerais (DEMIN-UFMG), por meio dos cruzamentos dos dados de referência, que pertencem ao banco de dados do PDF-2 Release 2010 do ICDD (*Internacional Centre for Diffraction Data*).



Figura 4-16: Difratômetro da marca Panalytical

Fonte: Campos, 2022.

4.3.6 Fluorescência de Raios X (FRX)

A quantificação dos elementos químicos presentes nas amostras foram realizadas para a amostra de ROM e, posteriormente, para as faixas granulométricas, resultantes dos processos de peneiramento.

Para a amostra de ROM, utilizou-se o método de fluorescência de raios X, no laboratório externo ITAK, em João Monlevade, Minas Gerais.

A quantificação dos elementos químicos presentes nas amostras, após as etapas de preparação, bem como o afundado e flotado, foram realizadas através do método de fluorescência de raios X, no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (DEMIN-UFMG).

4.4 Flotação em bancada

Para os testes de flotação foi utilizada a célula de bancada, modelo *McDarma D12*, da *Denver*, empregando o reagente amidoamina, Flotisor 5530. O equipamento usado é apresentado na Figura 4-17. Os testes foram realizados no Laboratório de Fenômenos de Interfaces (LFI), na UFMG.



Figura 4-17: Célula de flotação Denver

Fonte: Elaboração própria.

Duas baterias de testes foram realizadas, uma com o pH de 8,5 e outra com o pH de 10,5. Na sequência, a Tabela 4-4 apresenta os parâmetros empregados nos testes, e as Tabelas 4-5 e 4-6 exibem as dosagens empregadas para ambos os pHs, bem como as identificações dos testes, respectivamente. Os testes foram realizados em duplicatas.

Tabela 4-4: Parâmetros para flotação em bancada

Parâmetro	Valor
Massa de minério (Ms)	637,5
% Sólidos da flotação (%)	50
Volume da cuba (ml)	1000
Rotação (rpm)	1200
Tipo de reagente	Amidoamina (Flotisor 5530)
Tempo de condicionamento inicial (min)	2
Tempo de condicionamento reagente (min)	8
Vazão de ar (NL/min)	4

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4-5: Identificação dos testes - pH 8,5

Reagente - Amidoamina Flotisor 5530	
pH = 8,5	
Identificação do teste	Dosagem (g/t)
T1	50
T2	100
T3	150
T4	200

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4-6: Identificação dos testes - pH 10,5

Reagente - Amidoamina Flotisor 5530	
pH = 10,5	
Identificação do teste	Dosagem (g/t)
T1	50
T2	100
T3	150
T4	200

Fonte: Elaboração própria.

- a) Foram pesadas 637,5 g do material a ser utilizado no teste;
- b) O material pesado no item (1) foi adicionado a uma cuba de 1000 ml;
- c) Foram adicionados cerca de 637,5 ml de água, para a formação de uma polpa com 50% de sólidos;
- d) O rotor da célula de flotação foi ligada, a uma rotação de 1200 rpm;
- e) O pH da solução foi ajustado para 8,5, por meio dos modificadores de pH;
- f) A polpa foi condicionada por 2 minutos para garantir sua homogeneização;
- g) Foi adicionada com o término dos 2 minutos da etapa anterior, a amidoamina na dosagem especificada (flotisor 5530);
- h)** Esperar-se por oito minutos – tempo de condicionamento do reagente amidoamina;
- i) O pH da polpa foi medido. Caso o valor de pH não esteja nos valores adequados, ajuste o valor com o auxílio de reagentes moduladores de pH (NaOH e CH₃COOH);
- j) Avolumou-se a cuba com água previamente modulada no pH adequado para a realização do teste até o limite operacional da cuba;
- k) A vazão de ar 4 nl/min foi ligada e iniciou-se a flotação, com o auxílio de duas espátulas para retirada da espuma;
- l) Terminada a flotação, o material afundado e flotado foi destinado para a secagem;
- m) Realizam-se os testes em duplicata, para a verificação dos resultados.

Segue a Figura 4-18, ilustrando o fluxograma do ensaio da flotação em bancada.

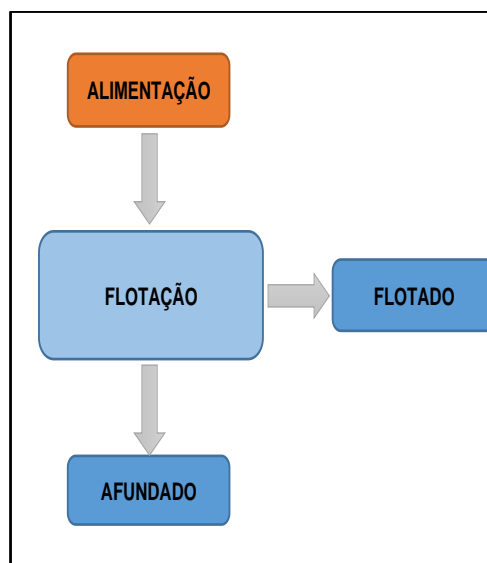


Figura 4-18: Fluxograma do ensaio da flotação em bancada.

Fonte: Elaboração própria.

4.4.1 Teste de viscosidade de polpa da flotação

Para o teste de viscosidade, foi empregado o viscosímetro de Brookfield. No teste utilizou-se o *spindle* 02, que foi submerso a polpa mineral. Na Figura 4-19, a foto ilustra o viscosímetro.



Figura 4-19: Viscosímetro de Brookfield

Fonte: Elaboração própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

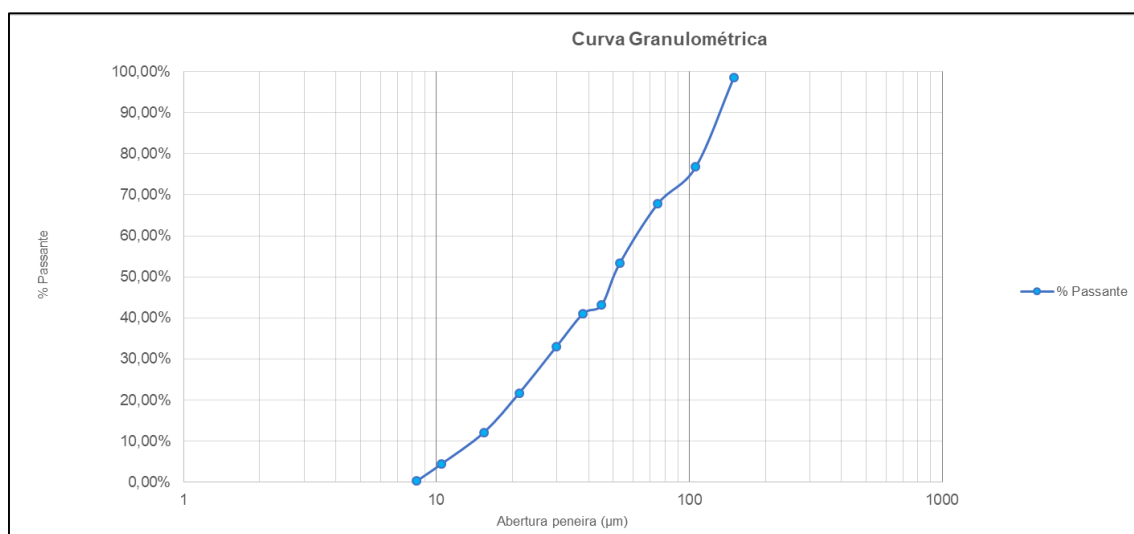
Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados da caracterização da amostra de minério de ferro, bem como os resultados da flotação em bancada.

5.1 Caracterização da amostra do minério de ferro

5.1.1 Análise Granulométrica

Os Apêndices 1 e 2 dispõem os resultados obtidos nas análises granulométricas. O Apêndice 3 refere-se aos resultados da análise do *cyclosizer*. das amostras. O Gráfico 5-1 refere-se à representação da curva da análise granulométrica.

Gráfico 5-1: Curva granulométrica



Fonte: Elaboração própria.

A partir das análises granulométricas, verificou-se que o P_{80} se encontra na faixa de 140 µm, logo a faixa é adequada para a concentração por meio da flotação. O Gráfico 5-1 apresenta a junção das análises realizadas por peneiramento a seco, corte a úmido e *cyclosizer*. O propósito de fundir as análises foi obter uma distribuição de tamanho de partículas mais abrangente e precisa do minério analisado.

5.1.2 Picnometria

Os resultados da picnometria são apresentados no Apêndice 4 desta dissertação.

As densidades foram obtidas, utilizando a Equação 2., e, posteriormente, calculou-se a média, da qual se obteve o valor de 3,936 g/cm³. Ressalte-se que os testes foram realizados em triplicata.

5.1.3 Difratometria de raios X (DRX)

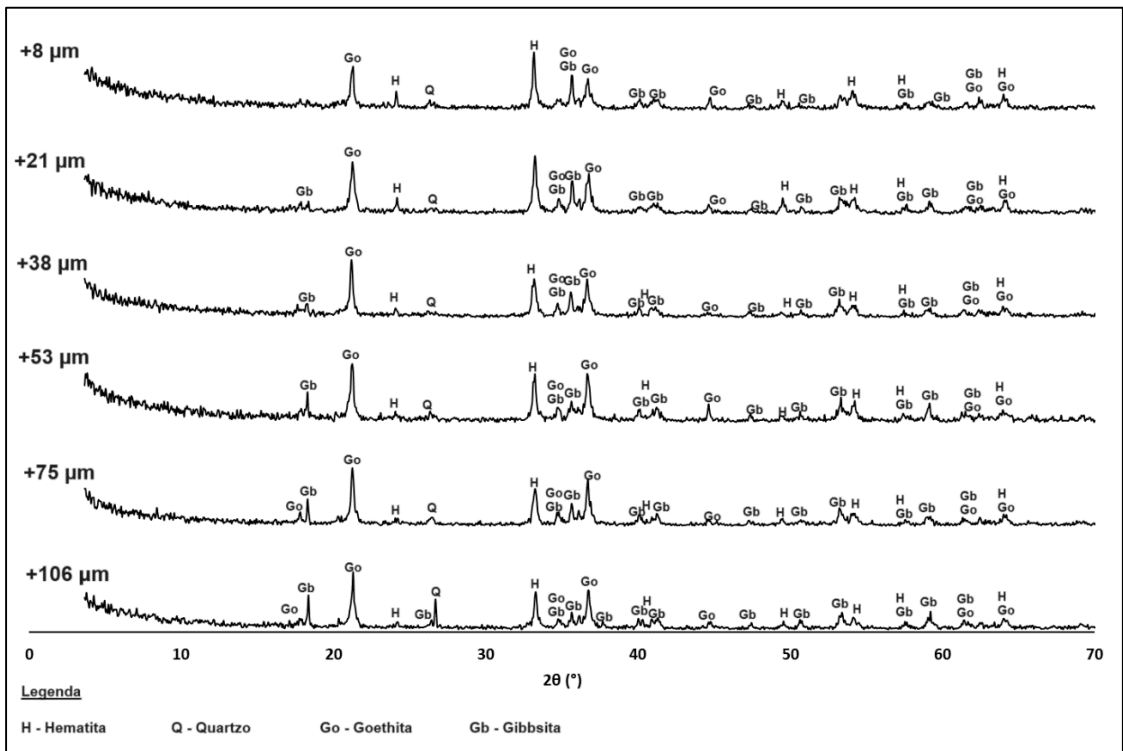
Foram analisadas seis amostras, por faixas granulométricas, com o objetivo de pesquisar e discorrer sobre a composição do minério em estudo. Foram obtidos difratogramas pelas faixas analisadas.

As frações granulométricas foram agrupadas com o intuito de obter uma representação mais completa e precisa da distribuição de/por tamanhos e, conseqüentemente, caracterizá-las.

Por meio das análises dos difratogramas, detectou-se que as amostras são compostas, basicamente, por hematita (Fe₂O₃), goethita (FeO(OH)) e gibbsita (Al(OH)₃). O Gráfico 5-3 dispõe uma análise dos dados obtidos.

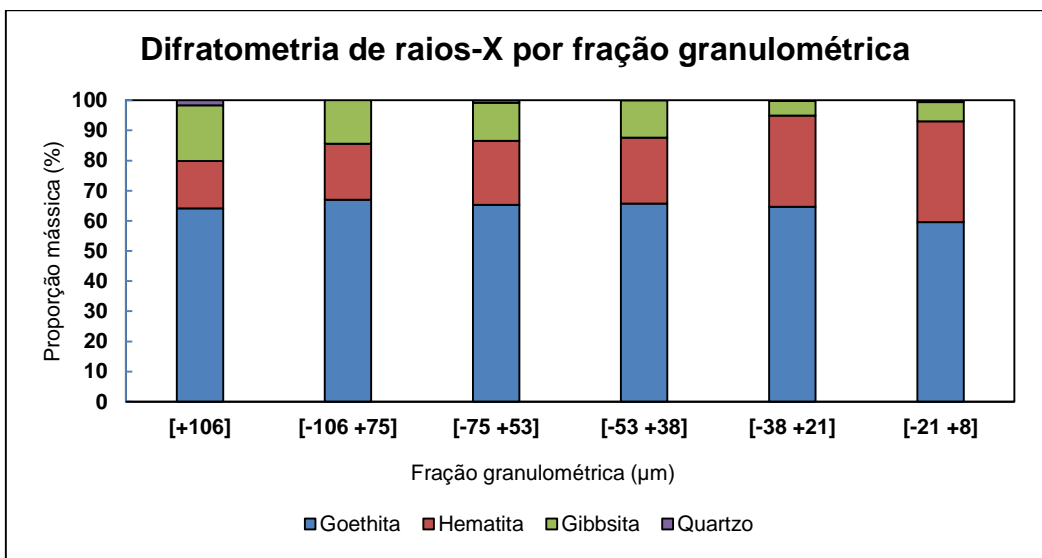
Os difratogramas são apresentados no Gráfico 5-2, a seguir.

Gráfico 5-2: Difratomogramas por faixas granulométricas



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 5-3: Difratometria de raios-x por faixa granulométrica



Fonte: Elaboração própria.

5.1.4 Fluorescência de raios X (FRX)

Nesta subseção, são apresentados os dados das análises de fluorescência de raios X, para o ROM e para as faixas granulométricas.

5.1.4.1 Fluorescência de raios X (FRX) – ROM

Por meio da análise de fluorescência de raios X do ROM, é possível observar que, em sua composição, há uma concentração considerável de Al_2O_3 , conforme mostra a Tabela 5-7. Foram realizadas três análises, e a tabela representa a média entre elas. A concentração de Fe é < 60 %. Além disso, para a sílica (SiO_2), a concentração é inferior a 3,5 %. Conforme esses dados, identificou-se que, para o minério em estudo, o principal contaminante é o alumínio (Al_2O_3).

Tabela 5-7: Resultado fluorescência de raios X - ROM

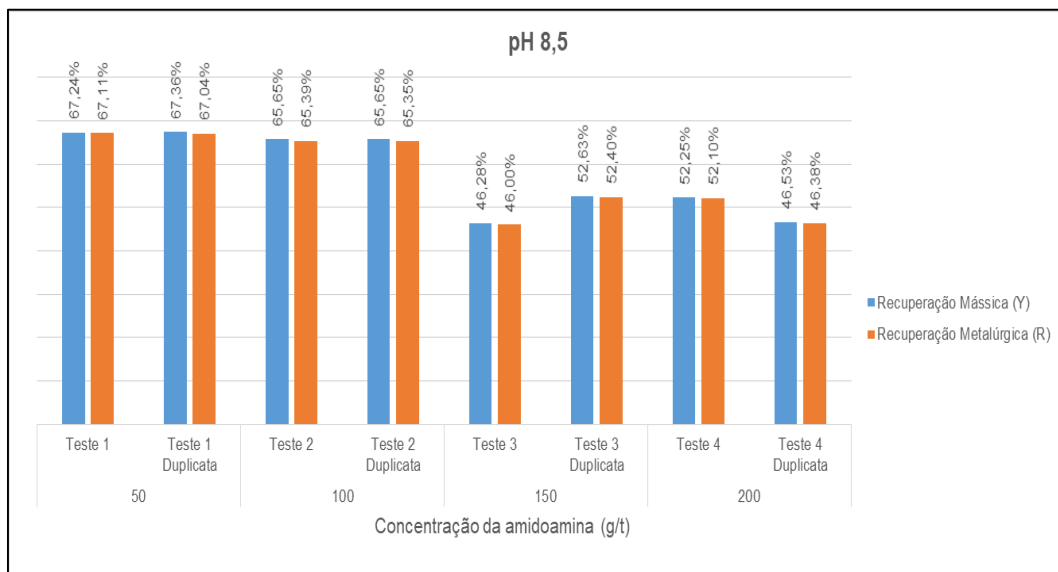
Resultados									
Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe (%)	K_2O (%)	MgO (%)	Mn (%)	P (%)	SiO_2 (%)	TiO_2 (%)	L.O.I. (%)
8,391	0,016	56,347	<0,03	0,136	0,041	0,049	2,866	0,211	9,295

Fonte: Elaboração própria.

5.2 Testes de flotação em bancada

O teor de ferro da alimentação da flotação foi de 58,18 % e o teor de alumínio de 7,68 %. No intuito de aumentar a concentração de ferro e conseguir separar o alumínio, usou-se a amidoamina no processo. Após a realização dos testes para os pHs de 8,5 e, posteriormente, 10,5, constatou-se que não ocorreu concentração.

Para o pH de 8,5, o Gráfico 5-4 ilustra os resultados das recuperações mássica e metalúrgica.

Gráfico 5-4: Recuperação mássica e recuperação metalúrgica de Fe - pH 8,5

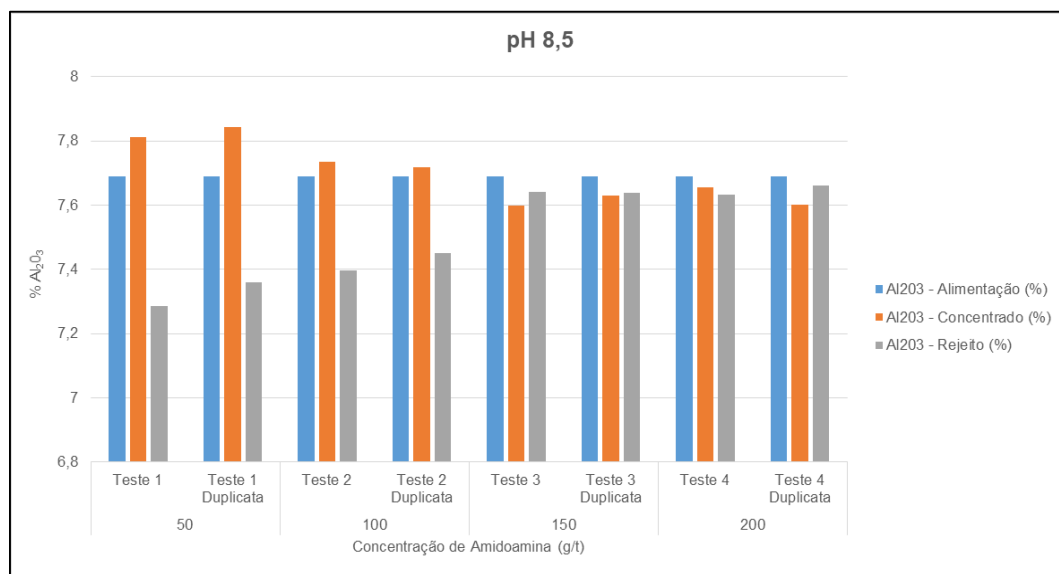
Fonte: Elaboração própria.

No que tange aos dados de recuperação mássica do Fe (barras representadas na cor azul), os valores indicam que, não só uma baixa quantidade de minério de ferro foi recuperada na flotação realizada, mas, também, que o processo não foi eficaz no tocante à separação do alumínio. No entanto, notou-se que a recuperação mássica para as concentrações de amidoamina de 50 e 100 g/t foram >65%. Já para as concentrações de 150 e 200 g/t, as recuperações mássicas foram <53%.

Sobre a recuperação metalúrgica, observou-se um comportamento similar com a recuperação mássica. Para as concentrações de 50 g/t e 100 g/t, há uma recuperação maior, se forem comparadas às dosagens (concentrações) de 150 g/t e 200 g/t, mas, mesmo havendo essa diferença, é óbvio que não houve uma boa recuperação do elemento ferro.

O alumínio fez-se presente em proporções bastante similares no concentrado e no rejeito, sendo este mais um indicativo de que não houve seletividade nos testes realizados para o pH 8,5, com diferentes concentrações da amidoamina. O Gráfico 5-5, em seguida, expõe a porcentagem do alumínio presente na alimentação, concentrado e rejeito, nos testes realizados, de acordo com as dosagens empregadas.

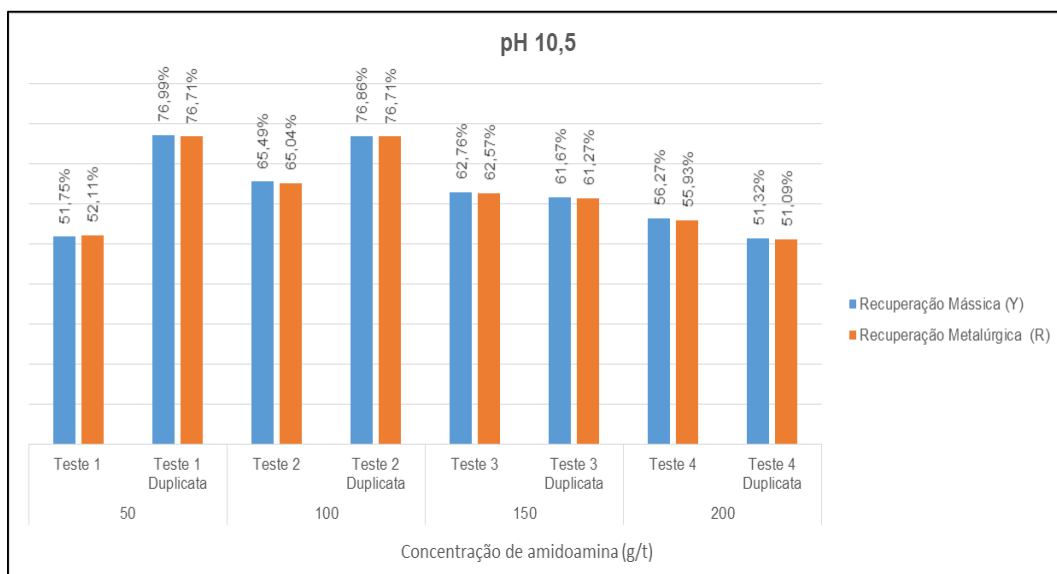
Gráfico 5-5: % de Al₂O₃ para o pH 8,5



Fonte: Elaboração própria.

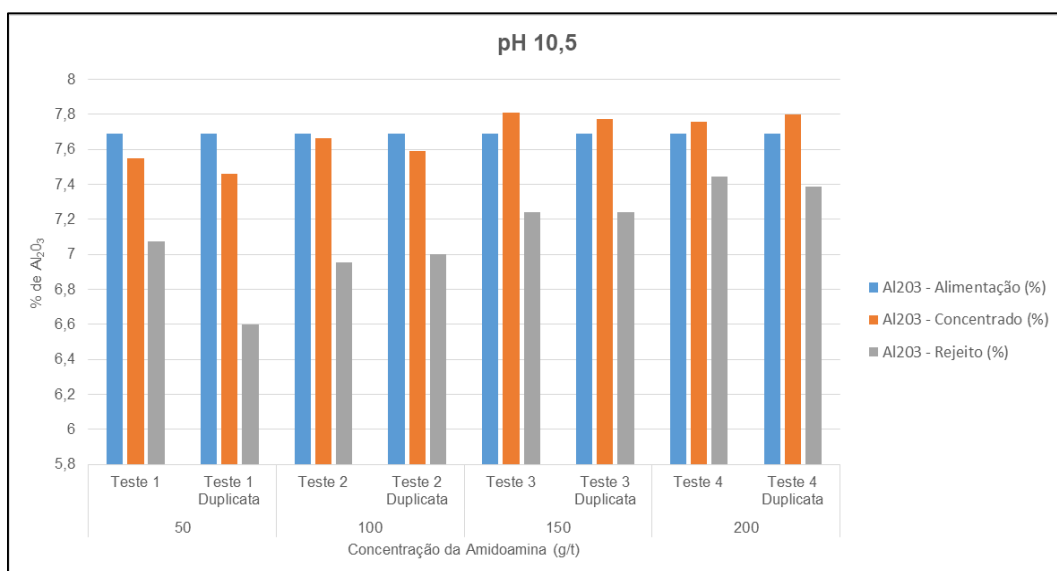
No tocante ao pH de 10,5, notaram-se comportamentos bem distintos para as recuperações mássica e metalúrgica, isto é, para a concentração de 50 g/t, há uma grande diferença entre o teste principal e em duplicata. As recuperações mássica e metalúrgica foram >75.

Comparando os dados do Gráfico 5-4 e os do Gráfico 5-6, referentes à concentração de 150 g/t de amidoamina, percebeu-se que, para o pH 10,5, há um resultado mais atrativo para as recuperações mássica e metalúrgica.

Gráfico 5-6: Recuperação mássica e recuperação metalúrgica de Fe - pH 10,5

Fonte: Elaboração própria.

O Gráfico 5-7 apresenta os resultados das porcentagens de alumínio presentes na alimentação, no concentrado e no rejeito, de acordo com as diferentes dosagens de amidoamina empregadas no estudo para o pH de 10,5.

Gráfico 5-7: % de Al₂O₃ para o pH 10,5

Fonte: Elaboração própria.

Do Gráfico 5-7, é possível inferir que a menor quantidade de alumínio estava concentrada no rejeito e uma porcentagem maior no concentrado, mostrando que não houve seletividade nas flotações realizadas, isto é não houve separação.

Atráves dos resultados apresentados nos Gráficos 5-4, 5-5, 5-6 e 5-7 e, principalmente nos Apêndices 6 e 7 sobre o teores de ferro, percebeu-se que no concentrado (c), não há enriquecimento do teor do elemento útil; além disso, o rejeito (r) apresentou-se com valores bem próximos à porcentagem do elemento útil do concentrado. Logo, a flotação atuou apenas como um corte de massa.

Sobre o alumínio, a quantidade do elemento no concentrado é bem semelhante à porcentagem do elemento na alimentação e também no rejeito, mostrando, também, que não houve separação, objeto de estudo deste trabalho.

Diante dos resultados obtidos com a flotação, alguns aspectos que implicaram esses resultados são elucidados a seguir, sendo eles, a viscosidade, a presença do mineral goethita como constituinte principal do minério em estudo e a reação da amidoamina com o NaOH.

Para entender e justificar esses comportamentos, executaram-se testes complementares. A saber: a análise de viscosidade e de espectrometria de infravermelho (FTIR).

A indicação de se realizar o teste de viscosidade se deu pela observância de que, durante os testes de flotação, quando se preparava a polpa mineral, utilizando a água no pH adequado, ao adicionar a alíquota da flotação, havia um declínio imediato no pH, portanto, necessitava-se de uma quantidade significativa de solução de NaOH, cerca de 20 ml, para elevar o pH da polpa ao ideal, para realização da flotação. Ainda, observou-se que à medida que era inserida a solução de NaOH, a polpa tornava-se mais viscosa.

A medida da viscosidade foi realizada a partir do viscosímetro de Brookfield. Foi preparada uma polpa mineral com os mesmos parâmetros da polpa para os testes de flotação. O equipamento estava calibrado na unidade de medida centipoise (cP). O resultado obtido foi de 24,4 cP, conforme mostra a Figura 5-20.

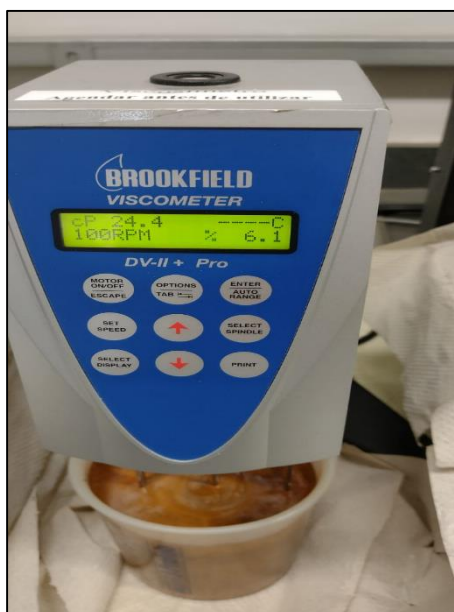


Figura 5-20: Resultado do teste de viscosidade

Fonte: Elaboração própria.

A viscosidade é um aspecto importante a ser observado na polpa mineral, uma vez que pode afetar a eficiência do processo de flotação de minérios. A viscosidade influencia a redução da velocidade de sedimentação das partículas de minério e das bolhas de ar, o que pode prolongar o tempo necessário para alcançar a separação desejada, além de afetar, também, a distribuição do tamanho das bolhas de ar geradas no processo de flotação. Uma polpa mais viscosa pode resultar em bolhas de ar de tamanho menor, o que pode influenciar a eficácia da adsorção dos reagentes de flotação na superfície das partículas de minério. Ademais, a viscosidade influi na dispersão eficaz de ar na célula de flotação, prejudicando, assim, a formação de bolhas de ar necessárias para a adesão das partículas de minério.

Ainda, para compreender o comportamento do NaOH com o minério em estudo, a espectrometria na região do infravermelho (FTIR) foi empregada. Foram realizadas análises distintas, variando os pHs, sendo eles, 8,5 e 10,5. Os pHs 8,5 e 10,5; foram aqueles utilizados para realizar os testes de flotação. Vale lembrar que as análises de FTIR foram em triplicata, técnica utilizada para identificar compostos e/ou investigar a composição.

As Figuras 5-21 e 5-22 indicam os resultados obtidos através da FTIR, para os pHs 8,5, e 10,5, respectivamente.

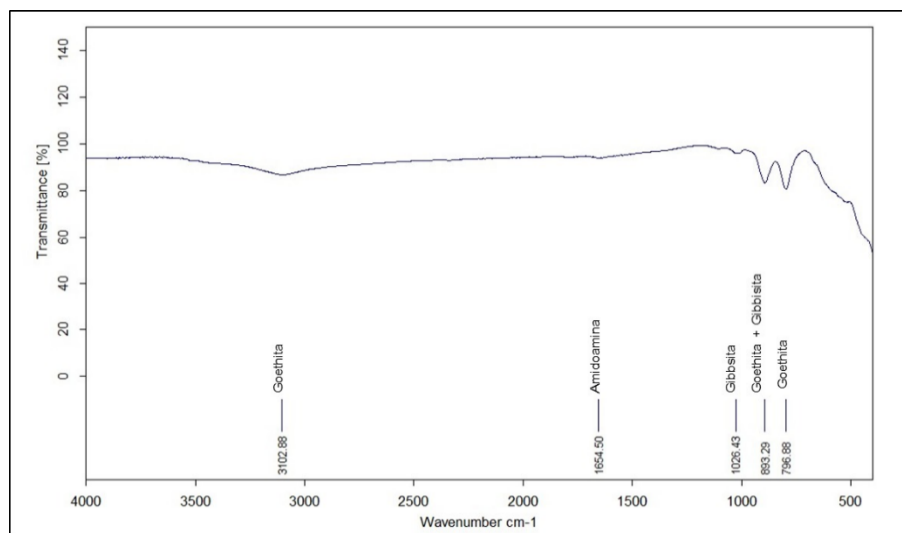


Figura 5-21: Análise por espectrometria na faixa do infravermelho - pH 8,5

Fonte: Elaboração própria.

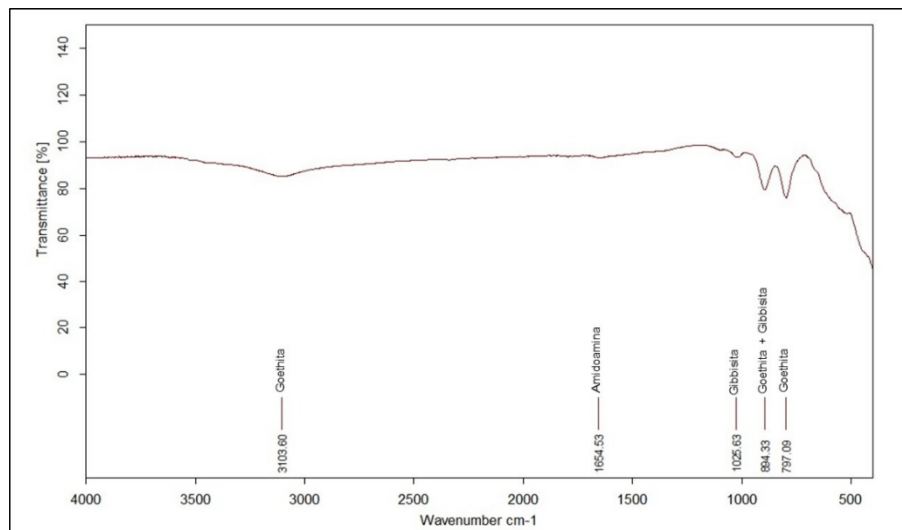


Figura 5-22: Análise por espectrometria na faixa do infravermelho - pH 10,5

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com os estudos de Silva *et.al.*, (2021), utilizando-se da espectrometria de infravermelho (FTIR), foram identificados comprimentos de ondas característicos para o coletor amidoamina, sendo eles: 3307, 3081, 2921, 2852, 2814, 2763, 1640, 1548, 1466,

1377, 1263, 1042, 840, 720. Na pesquisa realizada pelos autores referidos, os espectros obtidos demonstraram dois domínios, o primeiro na faixa que abrange de 2700 a 3300 cm^{-1} , característico das ligações de CH e NH, e o segundo domínio entre a faixa de 1640 e 600 cm^{-1} , que são característicos da amidoamina, devido às vibrações de estiramento C=O.

Observando os resultados apresentados nas Figuras 5-21 e 5-22, e comparando-os com dados presentes na literatura, há presença da amidoamina. Confrontando os dados obtidos na FTIR, com os da pesquisa de Henriques (2012), a análise por espectrometria, na faixa do infravermelho das amostras, indicam a presença dos minerais goethita e gibbsita.

A goethita está presente nesse minério utilizado neste estudo, conforme demonstrado no Gráfico 5-3 e diante dos resultados da FTIR, Figuras 5-21 e 5-22. De acordo com, Filippov *et al.*, (2021), a goethita contém quantidades significativas de Al_2O_3 . No caso do minério em estudo, a presença dessas impurezas, isto é, a grande quantidade de alumínio causa problema na seletividade da flotação catiônica reversa, uma vez que a amidoamina pode adsorver na goethita; nesse aspecto justifica-se o fato de não ocorrer a flotação nos testes realizados.

As reações específicas que ocorrem entre a amidoamina e a goethita durante a flotação de minério de ferro podem variar, dependendo das condições específicas do processo. No entanto, uma possível reação envolve a formação de complexos de superfície entre os grupos amina da amidoamina e os grupos hidroxila da superfície da goethita. Essa interação pode levar à formação de ligações químicas ou interações físicas, resultando na adsorção da amidoamina na superfície da goethita. A formação desses complexos pode interferir na eficiência da flotação, afetando a seletividade e a recuperação do minério de ferro.

A adsorção da amidoamina na superfície da goethita pode provocar várias consequências, incluindo:

- a) Redução da eficiência de coleta: a adsorção da amidoamina pode competir com a adsorção de outros coletores mais eficazes, reduzindo, assim, a quantidade de coletor disponível para aderir às partículas de minério de ferro;
- b) Diminuição da seletividade: a presença de amidoamina adsorvida na superfície da goethita pode promover a flotação de minerais indesejados junto com o minério de ferro,

resultando em uma separação menos seletiva;

c) Formação de complexos estáveis: os complexos de superfície formados entre a amidoamina e a goethita podem ser estáveis, afetando, negativamente, a recuperação do minério de ferro.

Outro aspecto importante a ser avaliado, é a reação da amidoamina com NaOH (hidróxido de sódio), reação que pode resultar na formação de uma solução aquosa de amônio (NH_4OH). Essa reação pode interferir na operação de flotação do minério de ferro.

A formação do amônio pode afetar o pH da solução, o que é crítico na flotação, uma vez que este pH interfere na carga elétrica das partículas e compromete a seletividade do processo, influenciando diretamente na recuperação e na qualidade do concentrado do minério.

Ressalte-se que a reação química entre a amidoamina e o hidróxido de sódio é de neutralização, uma vez que a amidoamina tem grupos NH que podem reagir com bases, como o NaOH. Íons de hidroxila reagem com íons de hidrogênio da amidoamina, formando o íons de amônio.

Isso posto, no capítulo 6, a seguir, apresentam-se, as Conclusões desta dissertação.

6. CONCLUSÕES

A avaliação do uso de amidoamina na flotação de minério de ferro com alto teor de alumínio proposta nesta pesquisa revelou aspectos relevantes sobre a eficácia e viabilidade dessa abordagem. Ao longo deste trabalho, foram abordados os efeitos da amidoamina na recuperação e seletividade do minério de ferro, levando em consideração sua interação com o alumínio presente na matriz mineral.

Os resultados obtidos indicaram que a amidoamina (Flotisor 5530) não se mostrou eficaz para a flotação das amostras de minério de ferro do estudo, não ocorrendo a separação eficiente dos minerais desejados, e, portanto, a concentração do ferro não foi possível.

Observou-se que aspectos relacionados à presença da goethita e sua interação com a amidoamina interferiram no processo, além de também ter intervido na interação entre a amidoamina e o hidróxido de sódio, que também impactou a eficiência da flotação.

Além disso, os aspectos elucidados, anteriormente, sugerem que ajustes específicos nas condições do processo para otimizar a *performance* da flotação devem ser aprofundados. Estratégias como a modificação do pH, concentração de reagentes e tempo de condicionamento devem ser explanados para mitigar os efeitos adversos ocorridos e, desse modo, promover a separação do alumínio, e, conseqüentemente, maximizar a recuperação do minério de ferro.

Em resumo, os resultados deste estudo fornecem uma base para a aplicação prática da amidoamina na flotação de minérios de ferro com alto teor de alumínio. Futuras pesquisas podem se concentrar em refinamentos adicionais das condições de processo voltadas para as amidoaminas, tal como considerar a combinação da amidoamina com outros reagentes, que devem ser realizados no intuito de viabilizar a flotação com alto teor de alumínio.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Ao término desta pesquisa, que não se esgota neste texto, porquanto representa apenas uma ínfima parte do que o objeto de estudo abrangeu, acredita-se haver temas cujos estudos se reputam relevantes para futuras investigações, uma sequência ao que se desenvolveu nesta dissertação. Nesse sentido, sugerem-se alguns deles.

- A influência da concentração de amidoamina na eficiência da flotação do minério de ferro com alto teor de alumínio;
- A cinética de adsorção da amidoamina na superfície das partículas de minério de ferro;
- O efeito do pH do sistema na interação entre a amidoamina e as partículas de minério de ferro, visando a otimizar as condições de flotação;
- O desempenho da amidoamina com outros coletores utilizados na flotação de minério de ferro, considerando tanto a eficiência de recuperação quanto a seletividade;
- Efeitos da presença de outros minerais acessórios no minério de ferro, como a sílica e os fosfatos, na interação entre a amidoamina e as partículas de minério.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. C; PERES, A. E.C; VIANA, P.R.M; OLIVEIRA, J. F. Flotação de Minérios de Ferro. In: CHAVES, Arthur Pinto. A Flotação no Brasil. 2. ed. São Paulo: Signus, 2009. p. 355-387

BALTAR, C. A. M. Flotação no tratamento de minério. Recife: Departamento de Engenharia de Minas – UFPE, 2021.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; COUTO, Hudson Jean Bianchini. ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA POR MEIO DE CICLOCLASSIFICADOR. In: LABORATORIAIS, Tratamento de Minérios: Práticas. TRATAMENTO DE MINÉRIOS: PRÁTICAS LABORATORIAIS. Rio de Janeiro: Cetem, 2007. p. 73-97.

BIMEDIS. PANALYTICAL AXIOS. Disponível em: <https://bimedis.com/panalytical-axios-wd-xrf-m463592>. Acesso em: 03 jan. 2024.

BULATOVIC, S. M. Handbook of flotation reagents; Chemistry, theory and practice. v.1, 1 ed. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2007. 446p.

CAMPOS, Leonardo Júnior Fernandes. FLOTAÇÃO DIRETA DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO: AVALIAÇÃO DE COLETORES MISTOS. 2022. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Mineral, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

CHAVES, A. P; I. FILHO, L. S; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B *et al* (ed.). Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. p. 465-512.

CHEMALE. F. J ; TAKEHARA, L. Minério de ferro: Geologia e Geometalurgia. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

CHEMALE. F. J; ROSIÈRE, C.A; ENDO, I. Evolução Tectônica do Quadrilátero

Ferrífero, Minas Gerais – Um Modelo. Pesquisa, UFRGS, Porto Alegre, v. 18, n.2, p.104-127, 1991.

COSTA, Geraldo Magela da; COUTO, Marcela Luciana Figueirêdo; CARIOCA, Ana Cláudia; DUTRA, Flávio de Castro. Formas de ocorrência de alumínio e fósforo em minérios de ferro. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 206-209, 2010. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00604004>.

FARINA F., Albert C., Mar nez Dopico C., Aguilar Gil C., Moreira H., Hipper J.P., Cu s K., Alkmim F.F., Lana C. 2015. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open ques ons. Journal of South American Earth Sciences, 68: 4-21.

FERREIRA, C.R.N. Métodos de flotação de minérios de ferro. Escola de Engenharia, UFMG, 2015. 52 p. (Dissertação de Mestrado, Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais)

FILIPPOV, Lev O.; SILVA, Klaydison; PIÇARRA, Alexandre; LIMA, Neymayer; SANTOS, Iranildes; BICALHO, Leandro; FILIPPOVA, Inna V.; PERES, Antonio Eduardo Clark. Iron Ore Slimes Flotation Tests Using Column and Amidoamine Collector without Depressant. **Minerals**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 699, 29 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min11070699>.

HENRIQUES, Andréia Bicalho. Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita. 2012. 208 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MA, M. Froth flotation of iron ores. International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing, 2012, 1(2): 56-61.

MATIOLO, Elves; COUTO, Hudson Jean Bianchini; LIMA, Neymayer; SILVA, Klaydison; FREITAS, Amanda Soares de. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. *Minerals Engineering*, [S.L.], v. 158, p. 106608, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106608>.

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

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P. *A Flotação no Brasil*. 2. ed. São Paulo: Signus, 2009. p. 1-30.

ROSIÈRE, C.A; CHEMALE, F.J; GUIMARÃES, M.L.V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Pare I: Estruturas e Recristalização. *Geonomos*, v. 1, n. 1, p. 65-84, 1993.

SILVA, Klaydison; FILIPPOV, Lev O.; PIÇARRA, Alexandre; FLILIPPOVA, Inna V.; LIMA, Neymayer; SKLIAR, Anna; FAUSTINO, Lívia; LEAL FILHO, Laurindo. New perspectives in iron ore flotation: use of collector reagents without depressants in reverse cationic flotation of quartz. *Minerals Engineering*, [S.L.], v. 170, p. 107004, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107004>.

TEIXEIRA, W. et al. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archaean Evolution of gneissic-granitoid complexes in the Southern São Francisco Craton, Brazil. *Pre-cambrian T=Research*, v,78, n. 1-3, p. 151-164, 1995.

WILLS, B. *A Mineral processing technology*. Pergamon Press. Oxford, 1988, p.71-165.

APÊNDICE

Apêndice 1: Análise Granulométrica por peneiramento

ALIMENTAÇÃO (g)			80,1	
Abertura (µm)	Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Passante
150	2,04	2,55%	2,55%	97,45%
106	28,80	35,96%	38,50%	61,50%
75	10,22	12,76%	51,26%	48,74%
53	20,12	25,12%	76,38%	23,62%
45	16,22	20,25%	96,63%	3,37%
38	1,94	2,42%	99,05%	0,95%
FUNDO	0,76	0,95%	100%	0%

Apêndice 2: Análise Granulométrica por peneiramento

ALIMENTAÇÃO (g)			75,0	
Abertura (µm)	Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Passante
150	1,60	2,13%	2,13%	97,87%
106	28,28	37,71%	39,84%	60,16%
75	13,30	17,73%	57,57%	42,43%
53	17,91	23,88%	81,45%	18,55%
45	10,18	13,57%	95,03%	4,97%
38	3,70	4,93%	99,96%	0,04%
FUNDO	0,03	0,04%	100,00%	0,00%

Apêndice 3: Resultados obtidos no Cyclosizer

Ciclone	Tamanho Teórico	Fator de correção	Tamanho Real	Massas (g)			% Retida	% Acumulada	% Passante
				Filtro	Filtro + Amostra	Amostra			
1	42,7	0,697	29,76	3,72	11,274	7,554	19,77%	19,77%	80,23%
2	30,5	0,697	21,26	3,67	14,203	10,533	27,57%	47,35%	52,65%
3	22,1	0,697	15,40	3,7	12,722	9,022	23,62%	70,97%	29,03%
4	15	0,697	10,46	3,64	10,851	7,211	18,88%	89,84%	10,16%
5	12	0,697	8,36	3,69	7,57	3,88	10,16%	100,00%	0,00%

Apêndice 4: Resultado picnometria

VARIÁVEIS	TESTES			
	1	2	3	4
Picnômetro vazio (g)	68,21	76,72	62,53	104,39
Picnômetro + minério (g)	97,66	112,04	109,83	157,59
Picnômetro + minério + água (g)	189,42	203,94	199,17	393,15
Picnômetro + água (g)	168,21	176,26	164,16	354,34
Densidade (g/cm ³)	3,574	4,623	3,849	3,697
Média – densidade (g/cm ³)	3,936			
Desvio	0,472			

Apêndice 5: Resultado difratometria de raios-X

Difratometria de raios-X (DRX)						
Nome da amostra	Faixa Granulométrica (µm)	GOETHITA (%)	HEMATITA (%)	GIBBSITA (%)	QUARTZO (%)	Fechamento (%)
AM230985	42,7 + 30,5	64,70	30,20	4,90	0,10	100
AM230986	45 + 38	65,70	21,90	12,30	0,00	100
AM230987	53	65,30	21,20	12,70	0,80	100
AM230988	22,1 + 15 + 12	59,60	33,40	6,40	0,50	100
AM230989	75	67,00	18,60	14,40	0,00	100
AM230990	150 + 106	64,10	15,80	18,40	1,70	100

Apêndice 6: Resultado dos testes de flotação pH 8,5

Fe										
Teste	Concentração (g/t)	Concentração (ml)	Alimentação (g)	Flotado (g)	Afundado (g)	a (%)	c (%)	r (%)	Y	R
Teste 1	50	3,2	637,5	283,32	329,9	58,1842	58,5915	58,4121	51,7%	52,11%
Teste 1 Duplicata	50	3,2	637,5	127,6	490,83	58,1842	57,9705	58,8946	77,0%	76,71%
Teste 2	100	6,4	637,5	200,84	417,47	58,1842	57,7858	58,3881	65,5%	65,04%
Teste 2 Duplicata	100	6,4	637,5	132,6	489,98	58,1842	58,073	58,3792	76,9%	76,71%
Teste 3	150	9,6	637,5	218,66	400,1	58,1842	58,0102	58,1641	62,8%	62,57%
Teste 3 Duplicata	150	9,6	637,5	226,68	393,14	58,1842	57,8059	57,9998	61,7%	61,27%
Teste 4	200	12,8	637,5	263,79	358,73	58,1842	57,8341	58,1248	56,3%	55,93%
Teste 4 Duplicata	200	12,8	637,5	293,39	327,14	58,1842	57,9273	57,8185	51,3%	51,09%
Al ₂ O ₃										
Teste	Concentração (g/t)	Concentração (ml)	Alimentação (g)	Flotado (g)	Afundado (g)	a (%)	c (%)	r (%)	Y	R
Teste 1	50	3,2	637,5	283,32	329,9	7,6885	7,5472	7,0748	51,75%	50,80%
Teste 1 Duplicata	50	3,2	637,5	127,6	490,83	7,6885	7,4613	6,5965	76,99%	74,72%
Teste 2	100	6,4	637,5	200,84	417,47	7,6885	7,6632	6,9515	65,49%	65,27%
Teste 2 Duplicata	100	6,4	637,5	132,6	489,98	7,6885	7,5912	6,9997	76,86%	75,89%
Teste 3	150	9,6	637,5	218,66	400,1	7,6885	7,8088	7,2387	62,76%	63,74%
Teste 3 Duplicata	150	9,6	637,5	226,68	393,14	7,6885	7,7709	7,2384	61,67%	62,33%
Teste 4	200	12,8	637,5	263,79	358,73	7,6885	7,7558	7,4459	56,27%	56,76%
Teste 4 Duplicata	200	12,8	637,5	293,39	327,14	7,6885	7,8	7,3877	51,32%	52,06%

Apêndice 7: Resultado dos testes de flotação pH 10,5

Fe										
Teste	Concentração (g/t)	Concentração (ml)	Alimentação (g)	Flotado (g)	Afundado (g)	a (%)	c (%)	r (%)	Y	R
Teste 1	50	3,2	637,5	201,26	428,64	58,1842	58,0718	58,2679	67,24%	67,11%
Teste 1 Duplicata	50	3,2	637,5	201,59	429,42	58,1842	57,9096	58,2470	67,36%	67,04%
Teste 2	100	6,4	637,5	215,62	418,53	58,1842	57,9538	58,3417	65,65%	65,39%
Teste 2 Duplicata	100	6,4	637,5	210,72	418,53	58,1842	57,9168	58,1936	65,65%	65,35%
Teste 3	150	9,6	637,5	329,77	295,05	58,1842	57,8259	58,0368	46,28%	46,00%
Teste 3 Duplicata	150	9,6	637,5	295,19	335,54	58,1842	57,9241	58,1934	52,63%	52,40%
Teste 4	200	12,8	637,5	303,73	333,11	58,1842	58,0122	57,8317	52,25%	52,10%
Teste 4 Duplicata	200	12,8	637,5	335,36	296,61	58,1842	58,0012	57,7618	46,53%	46,38%
Al ₂ O ₃										
Teste	Concentração (g/t)	Concentração (ml)	Alimentação (g)	Flotado (g)	Afundado (g)	a (%)	c (%)	r (%)	Y	R
Teste 1	50	3,2	637,5	201,26	428,64	7,6885	7,8134	7,2854	67,24%	68,33%
Teste 1 Duplicata	50	3,2	637,5	201,59	429,42	7,6885	7,8421	7,3598	67,36%	68,71%
Teste 2	100	6,4	637,5	215,62	418,53	7,6885	7,7347	7,3955	65,65%	66,05%
Teste 2 Duplicata	100	6,4	637,5	210,72	418,53	7,6885	7,7188	7,4516	65,65%	65,91%
Teste 3	150	9,6	637,5	329,77	295,05	7,6885	7,5974	7,6399	46,28%	45,73%
Teste 3 Duplicata	150	9,6	637,5	295,19	335,54	7,6885	7,6302	7,6372	52,63%	52,23%
Teste 4	200	12,8	637,5	303,73	333,11	7,6885	7,6566	7,6335	52,25%	52,04%
Teste 4 Duplicata	200	12,8	637,5	335,36	296,61	7,6885	7,6011	7,6600	46,53%	46,00%