



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS NA
FLOTABILIDADE DO QUARTZO**

Aluno: Jean Lacerda Fonseca
Orientadora: Dra Francielle Câmara Nogueira

**BELO HORIZONTE
2022**

JEAN LACERDA FONSECA

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS PARTÍCULAS NA
FLOTABILIDADE DO QUARTZO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Minas da Universidade do Federal de Minas Gerais.

Orientadora: Dra. Francielle Câmara Nogueira

BELO HORIZONTE

2022

RESUMO

Este trabalho foi realizado com objetivo de estudar a influência da granulometria na flotabilidade de partículas do quartzo. Para tanto, foram realizados testes de microflotação em um tubo de Hallimond modificado adaptado com extensores de diferentes alturas variando a concentração de coletor (Flotigam EDA) e o tempo de flotação. A amostra de quartzo foi cominuída e classificada em três faixas de tamanho, finos ($< 38 \mu\text{m}$), intermediários ($-150 +38 \mu\text{m}$) e grossos ($+150 -300 \mu\text{m}$). Observou-se que a fração fina apresentou valores de arraste hidrodinâmico em torno de 47,67% na ausência de extensor. O uso do extensor grande minimizou o arraste mecânico das partículas desta fração para 15,7%. Em relação à concentração do coletor, observou-se que o aumento da concentração resultou no aumento da flotabilidade do mineral em todas as faixas analisadas. A faixa granulométrica fina, apresentou índices de flotabilidade menores que a faixa intermediária e grossa para todas as condições testadas. Comprovou-se a importância da hidrofobicidade para a flotabilidade das partículas grossas que alcançou 85,7% com a concentração do coletor igual a 10 mg/L. Em relação ao tempo de flotação, observou-se que as partículas finas apresentam baixa cinética de flotação. A velocidade de flotação aumentou com o tamanho das partículas e as partículas de tamanho intermediários e grossos atingiram flotabilidade máxima após 3 minutos de coleta. Ao contrário do esperado, não foi observada a diminuição da flotabilidade das partículas classificadas como grossas, indicando que para o mineral quartzo a fração compreendida entre $(+150 -300) \mu\text{m}$ está dentro do limite adequado a microflotação.

Palavras-chave: microflotação; quartzo; arraste hidrodinâmico; granulometria.

ABSTRACT

This work was carried out with the aim of studying the influence of granulometry on the flotability of quartz particles. Microflotation tests were performed on a modified Hallimond tube adapted with extensors of different heights, varying collector concentration (Flotigam EDA) and flotation time. The quartz sample was comminuted and classified into three size ranges, thin ($< 38 \mu\text{m}$), intermediate ($-150 +38 \mu\text{m}$) and thick ($+150 -300 \mu\text{m}$). Was observed that the fine fraction presented hydrodynamic drag values around 47.67% in the absence of an extensor. The use of the large extender minimized the mechanical drag of the particles of this fraction to 15.7%. Regarding the concentration of the collector, was observed that the increase in concentration resulted in an increase in the flotability of the mineral in all analyzed ranges. The thin granulometric range presented lower flotability indexes than the intermediate and thick range for all tested conditions. The importance of hydrophobicity was proved for the flotability of coarse particles that reached 85.7% with the collector concentration equal to 10 mg/L. In relation to flotation time, was observed that fine particles present low flotation kinetics. Flotation speed increased with particle size and intermediate and thick size particles reached maximum flotability after 3 minutes of collection. Contrary to what was expected, there was no decrease in the flotability of particles classified as thick, indicating that for the quartz mineral the fraction between ($+150 -300$) μm is within the appropriate microflotation limit.

Keywords: microflotation; quartz; entrainment; particle size.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva esquemática de dissociação da amina	14
Figura 2: Dissociação da dodecilamina a partir da concentração e pH.....	15
Figura 3: Potencial Zeta do mineral quartzo NaCl (10^{-3} M)	16
Figura 4: Processo de adsorção de um coletor catiônico e formação de hemimicelas	17
Figura 5: Relação entre a granulometria das partículas e recuperação na flotação..	19
Figura 6: Flotabilidade em função da granulometria da calcocita para diferentes concentrações de coletor	20
Figura 7: Influência da presença de finos na flotação	21
Figura 8: Relação flotabilidade, hidrofobicidade e tamanho de partícula	24
Figura 9: Flotabilidade do quartzo aumentando concentração de amina	25
Figura 10: Fluxograma de preparação das amostras de quartzo para microflotação	29
Figura 11: Diferentes montagens do Tubo de Hallimond utilizado nos testes de microflotação	32
Figura 12: Difratoograma de raios - X da amostra de quartzo.....	35
Figura 13: Distribuição granulométrica da fração fina da amostra de quartzo	36
Figura 14: Arraste das partículas de quartzo em função da granulometria e da configuração do tubo de Hallimond	37
Figura 15: Flotabilidade do quartzo em função da concentração do coletor	39
Figura 16: Flotabilidade do quartzo em função do tempo de coleta	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mineralogia de diferentes tipos de formações ferríferas.....	12
Tabela 2: Principais minerais de ferro e seu teor teórico	13
Tabela 3: Classificação de partículas por tamanho	18
Tabela 4: Reagentes utilizados nos experimentos de microflotação.....	30
Tabela 5: Concentração de coletor utilizado nos experimentos de microflotação	30
Tabela 6: Sequência dos experimentos de microflotação	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivos Específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	Minério de Ferro	11
3.2	Rotas de Processamento do Minério de Ferro.....	13
3.3	Reagentes Utilizados na Flotação Catiônica Reversa.....	14
3.4	Classificação das Partículas por Tamanho	17
3.5	Influência do Tamanho das Partículas na Flotação	18
3.6	Alternativas para Tratamento de Partículas Finas	24
3.6.1	Aumento da concentração do coletor	24
3.6.2	Aumento do tempo de permanência.....	25
3.6.3	Diminuição do tamanho das bolha.....	26
3.6.4	Uso de dispersante.....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Preparação da Amostra de Quartzo.....	28
4.2	Análise de Difractometria de Raios-X	29
4.3	Análise Granulométrica	29
4.4	Análise de Densidade	30
4.5	Reagentes Utilizados	30
4.5.1	Preparação da solução de Flotigam – EDA.....	30
4.5.2	Preparação das soluções reguladoras de pH.....	31
4.6	Experimentos de Microflotação	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Caracterização da Amostra de Quartzo	35
5.2	Análise Granulométrica	36

5.3	Análise de Densidade	36
5.4	Experimentos de Microflotação	36
5.4.1	Flotabilidade do quartzo em função da concentração do coletor	38
5.4.2	Flotabilidade do quartzo em função do tempo de coleta	40
6	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é uma das matérias-primas fundamentais para a obtenção do aço e seus derivados, produtos que abastecem a indústria siderúrgica que é um setor de extrema relevância para o desenvolvimento e crescimento econômico dos países. Entretanto, em função da escassez de minérios com altos teores de ferro e baixos conteúdos de contaminantes, a obtenção de produtos com características apropriadas para abastecer a indústria siderúrgica se dá através do beneficiamento de minérios com mineralogia cada vez mais complexa e granulometria de liberação cada vez menor.

De acordo com Matos (2017) a concentração por flotação é o método mais utilizado para o processamento dos minerais oxidados de ferro, presentes em minérios com baixos teores de ferro e ganga silicatada, como os encontrados no Quadrilátero Ferrífero. O autor salienta que este processo é possível através da utilização de reagentes que alteram as propriedades superficiais das partículas, mantendo os minerais de ferro hidrofílicos e tornando as partículas de quartzo hidrofóbicas.

Apesar da alta capacidade de utilização da flotação, existem alguns fatores limitantes do processo, dentre os quais destacam-se as características físico-químicas do minério, tais como: área superficial das partículas, textura, composição química e principalmente presença de partículas com granulometria fina.

Devido a pequena massa, a alta energia superficial e a alta superfície específica a presença de finos nos processos de flotação resultam em problemas conhecidos como o arraste mecânico das partículas, *slime coating*, baixa probabilidade de colisão das partículas com as bolhas de ar, elevado consumo e baixa seletividade dos reagentes, rigidez excessiva da espuma, interferindo diretamente nos resultados de teor e recuperação do processo.

Diante deste contexto, propôs-se este trabalho que buscou compreender a influência do tamanho das partículas do quartzo, principal mineral de ganga presente no minério de ferro, no processo de flotação catiônica reversa, entendendo fenômenos

relacionados ao arraste hidrodinâmico, consumo de reagente e cinética de flotação deste mineral.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da granulometria do quartzo no processo de flotação, bem como analisar a dificuldade na flotação de finos desse mineral.

2.1 Objetivos Específicos

- a)** Levantar a problemática da flotação de partículas finas;
- b)** Realizar a caracterização da amostra de quartzo;
- c)** Medir a flotabilidade do quartzo com diferentes granulometrias, através de testes de microflotação, variando a concentração dos reagentes e o tempo de flotação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, abordando tópicos relacionados à constituição e beneficiamento do minério de ferro, bem como a influência do tamanho das partículas no processo de flotação.

3.1 Minério de Ferro

O termo minério de ferro refere-se a um agregado de minerais explorado com vantagens econômicas devido ao conteúdo de ferro presente. De acordo com Andrade (2018) a Ucrânia, Rússia, China, Austrália e Brasil possuem as principais reservas desta *commodity*. As principais reservas brasileiras estão localizadas nos estados de Minas Gerais e Pará.

A mineralogia das rochas hospedeiras dos minérios de ferro podem ser variadas, dependendo das condições de deposição e do ambiente tectônico envolvido na formação geológica. Na Tabela 1 é possível observar e comparar diferentes tipos de minerais associados aos diversos tipos de formações ferríferas.

Tabela 1: Mineralogia de diferentes tipos de formações ferríferas

Tipos de Formação Ferrífera	Componentes Mineralógicos Principais	Componentes Acessórios
Itabirito comum	Hematita, martita, kenomagnetita, quartzo	Clorita, sericita, dolomita ferroana, caolinita, cianita, óxidos de Mn, sulfetos, apatita, pirofilita
Itabirito dolomítico	Martita, hematita, kenomagnetita, dolomita ferroana	Calcita, gruncrita-cummingtonita, clorita, stilpnomlelana, biotita, tremolita, actinolita, quartzo (chert), sulfetos, pirofilita
Itabirito anfibolítico	Martita, hematita, kenomagnetita, maghemita, gruncrita, cummingtonita, temolita, actinolita, quartzo	Carbonato, talco, dolomita ferroana, egirina, biotita, Mg-riebeckita, kupferita, sulfetos
Hematita – filito	Hematita, sericita	Quartzo, clorita
Filito piritoso	Pirita, matéria carbonosa	

Fonte: ROSIÉRE & JUNIOR (2013).

Ainda segundo Rosiére (2013), o Quadrilátero Ferrífero apresenta uma sequência relativamente monótona, com hematita como o óxido predominante, mesmo que de diferentes formas e o quartzo como mineral de ganga predominante indicando um parâmetro importante para a indústria no que se refere ao beneficiamento do material que alimenta as usinas.

O tipo de minério de ferro depende da composição mineralógica do mesmo, ainda que haja uma ampla distribuição dos minerais de ferro, poucas classes são economicamente exploráveis como os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Cada mineral possui teores de ferro diferentes. Os principais minérios de ferro e seu conteúdo teórico são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Principais minerais de ferro e seu teor teórico

Mineral	Fórmula Química	Conteúdo teórico de ferro (%)
Magnetita	Fe ₃ O ₄	72,4
Hematita	Fe ₂ O ₃	69,9
Goethita	Fe ₂ O ₃ -H ₂ O	62,9
Limonita	2Fe ₂ O ₃ -3H ₂ O	59,8
Ilmenita	FeTiO ₃	36,8
Siderita	FeCO ₃	48,2
Pirita	FeS ₂	46,5
Pirrotita	Fe _(1-x) S	61,0

Fonte: Carvalho *et. al.* (2014).

3.2 Rotas de Processamento do Minério de Ferro

Filippov *et al.* (2014) considera a flotação como o método mais eficiente para o beneficiamento do minério de ferro, tanto em termos tecnológicos quanto em termos econômicos. Alguns autores da literatura explicam que com a crescente demanda por pellet feed (fração do minério com granulometria inferior a 0,150 mm) com limitação em sílica, alumina e outras impurezas deletérias, o uso da flotação se destaca em relação a outros métodos como a concentração magnética e separação gravítica.

Segundo Araujo *et al.* (2005) as rotas de flotação disponíveis para a concentração de minério de ferro são: a flotação catiônica reversa de quartzo; flotação aniônica direta dos minerais de ferro e a flotação aniônica reversa de quartzo ativado.

Atualmente a flotação catiônica reversa é a mais amplamente utilizada nas indústrias brasileiras para o beneficiamento da fração classificada como *pellet feed*, onde a ganga (quartzo) é flotada através da adição de eteraminas parcialmente neutralizadas e os óxidos de ferro são deprimidos na polpa com o uso de amido não modificado. A flotação reversa ocorre em meio alcalino com o pH da polpa entre 10 e 10,5 (AGUIAR, 2014).

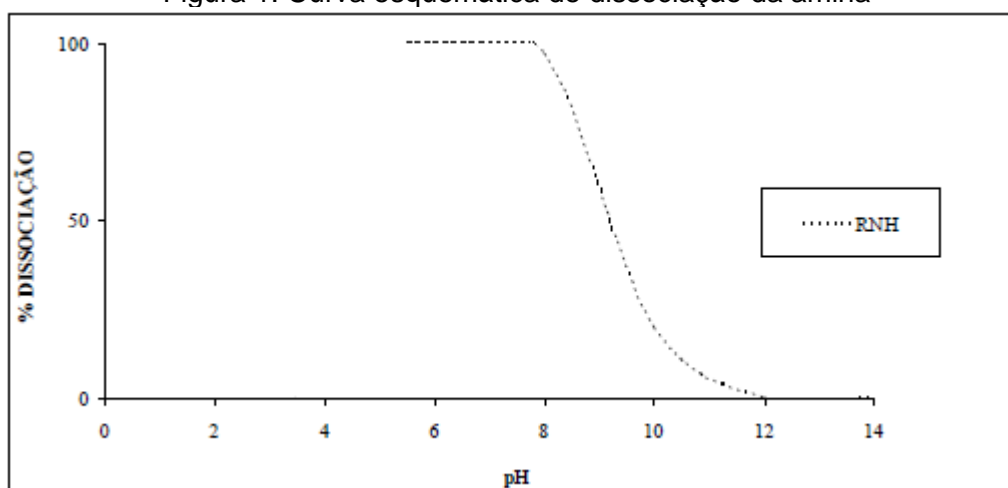
3.3 Reagentes Utilizados na Flotação Catiônica Reversa

Albino (2020) destaca que surfactantes catiônicos são desenvolvidos desde 1930, sendo que os representantes mais importantes desta classe são os acetatos e os cloretos de amina.

As aminas são bases derivadas da amônia (NH_3) que podem ser classificadas como primária, secundária e terciária dependendo do número de átomos de hidrogênio substituídos por cadeias hidrocarbônicas (LIMA, 2010). As aminas são formadas por moléculas heteropolares com uma parte apolar e outra polar, a primeira é composta por uma cadeia hidrocarbônica responsável pela hidrofobização da superfície, e a parte polar é responsável pela solubilidade do coletor e pela interação com as partículas minerais.

As aminas são bases fracas que se dissociam em função pH do meio e a compreensão deste processo é importante para a flotação, uma vez que a adsorção depende da concentração das espécies iônicas e moleculares do meio conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: Curva esquemática de dissociação da amina

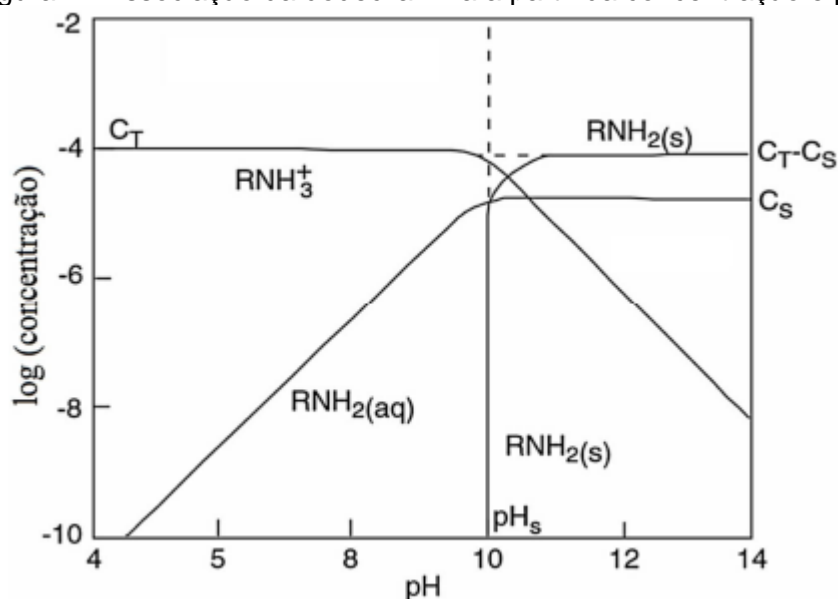


Fonte: Adaptado de Lima (2010)

Na Figura 2 tem-se o gráfico de dissociação da dodecilamina, representada pelo logaritmo da concentração em função do pH do sistema. É possível observar que na faixa de pH ácida ou pouco alcalina, prevalecem as espécies iônicas. Já na faixa de

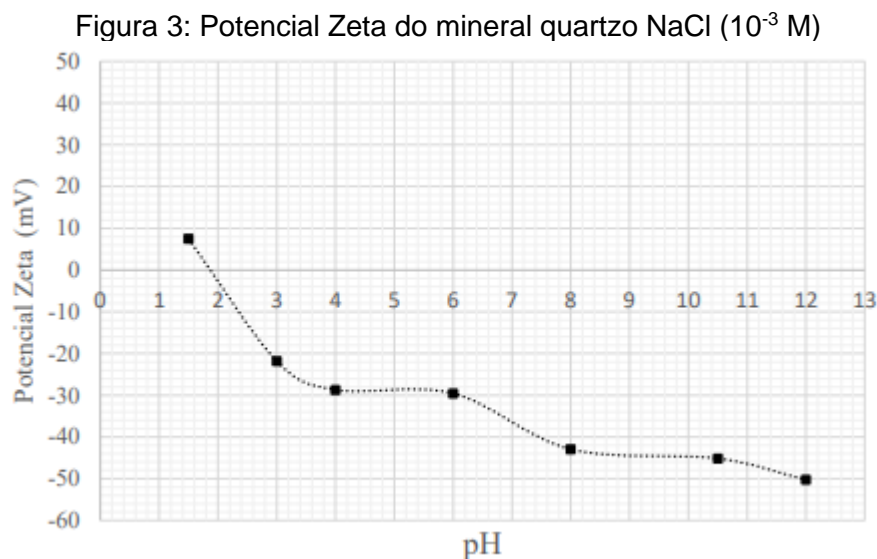
pH alcalina predomina a espécie molecular (RNH_2). Na região onde tem-se a maior concentração do dímero ($\text{RNH}_2 \cdot \text{RNH}_3^+$), que é a espécie com maior poder de hidrofobização é a faixa de pH em que são observados maiores valores de recuperação do quartzo.

Figura 2: Dissociação da dodecilamina a partir da concentração e pH



Fonte: Albino *apud* (Fuerstenau, Miller, Kuhn), 2020

O principal mecanismo de adsorção da amina nas partículas de quartzo pode ser atribuído a interação eletrostática, em que os sítios negativos da superfície mineral interagem com o grupo funcional positivo dissociado da amina (RNH_3^+). Ao relacionar o diagrama de dissociação da amina com a curva de potencial zeta do quartzo (Figura 3) é possível compreender o uso de coletores catiônicos, aminas, em operações de flotação deste mineral. Em meio muito ácido, ocorre repulsão entre o coletor catiônico e a superfície mineral carregada positivamente. A partir do ponto isoelétrico, identificado pela autora em $\text{pH}=1,8$ a superfície do quartzo passa a apresentar excesso de carga negativa, favorecendo a adsorção do coletor na superfície mineral. A flotação reversa ocorre em meio alcalino com o pH da polpa variando entre 10 e 10,5 que é quando a superfície apresenta grande excesso de carga negativa e quando o coletor apresenta maior concentração do dímero região onde tem-se a maior concentração do dímero ($\text{RNH}_2 \cdot \text{RNH}_3^+$).

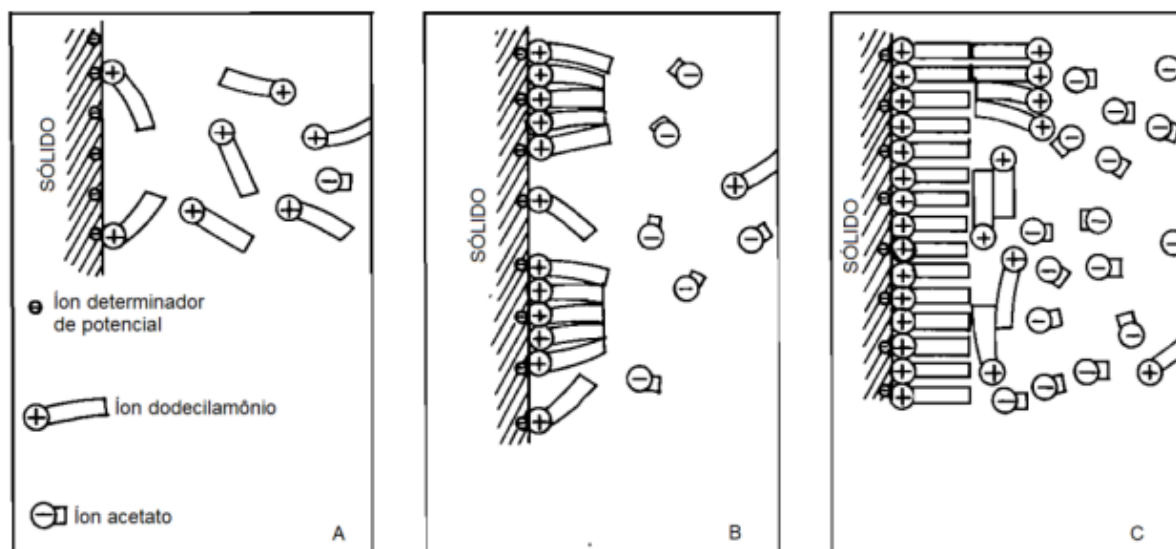


Fonte: Nogueira, 2019.

Além da interação eletrostática, em meio alcalino, pode haver a coadsorção da espécie molecular (RNH_2) do coletor que ocorre por meio de associações hidrofóbicas com a cadeia do coletor principal (já adsorvido na superfície mineral) formando complexos ionomoleculares representado pelo dímero ($\text{RNH}_2 \cdot \text{RNH}_3^+$) resultando no aumento da flotabilidade do sistema devido ao aumento do filme hidrofóbico formado na superfície mineral. Albino (2020), cita que a presença da amina na forma molecular (RNH_2) diminui a repulsão eletrostática entre os grupos catiônicos (RNH_3^+) o que contribui para uma maior densidade de adsorção.

Após a formação da monocamada, as espécies catiônicas excedentes podem formar dímeros do tipo $[(\text{RNH}_3)_2^{2+}]$ por meio de ligações cadeia-cadeia com moléculas já adsorvidas na superfície. Nesse tipo de adsorção são formadas hemimicelas e a parte polar do coletor é exposta a solução devolvendo a hidrofilicidade à superfície mineral. A Figura 4 ilustra a interação de um coletor catiônico com a superfície mineral, mostrando a adsorção de íons individuais do reagente (A-B) seguido pela formação das hemimicelas (C).

Figura 4: Processo de adsorção de um coletor catiônico e formação de hemimicelas



Fonte: Porfiro, 2019.

Mamede (2014) cita que o coletor catiônico mais utilizado industrialmente são sais de amônio primários de eteraminas, tendo como ânion o acetato e com cadeias hidrocarbônicas médias de 10 a 12 carbonos.

3.4 Classificação das Partículas por Tamanho

Na literatura não existe uma padronização para classificação de partículas por tamanho. Santana (2007) ressalta que é preciso cuidado quando se fala em finos ou grossos, porque em muitas situações uma partícula que é fina em um sistema pode ser considerada como grossa em outro e vice-versa.

Alguns autores utilizaram apenas a granulometria para a classificação por tamanho, já outros observam o comportamento do material em sistema aquoso. Santos (2010) *apud* Somasundaran (1980) classificou as partículas como:

- Fino: partículas com tamanho entre 10 μm e 100 μm e que a separação por métodos gravitacionais é difícil;
- Ultrafinos: partículas com tamanho entre 1 μm e 10 μm em que é difícil a concentração por métodos convencionais;
- Coloides: partículas de tamanho médio menor que 1 μm ;

d) Lamas: mistura de coloides e ultrafinos, cuja sedimentação é lenta.

Uma outra classificação do tamanho das partículas foi elaborada por Sivamohan (1990) e está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação de partículas por tamanho

Classificação	Tamanho (μm)
Supercoloides	< 0,2
Coloides	< 1
Ultrafinos	< 10
Superfinos	< 20
Finos	< 100
Médios	< 500
Grossos	> 500

Fonte: SIVAMOHAN, 1990

Neste trabalho foi definido como partículas grossas aquelas classificadas no intervalo entre 150 a 300 μm , partículas intermediárias entre 38 e 150 μm e partículas finas aquelas com granulometria abaixo de 38 μm .

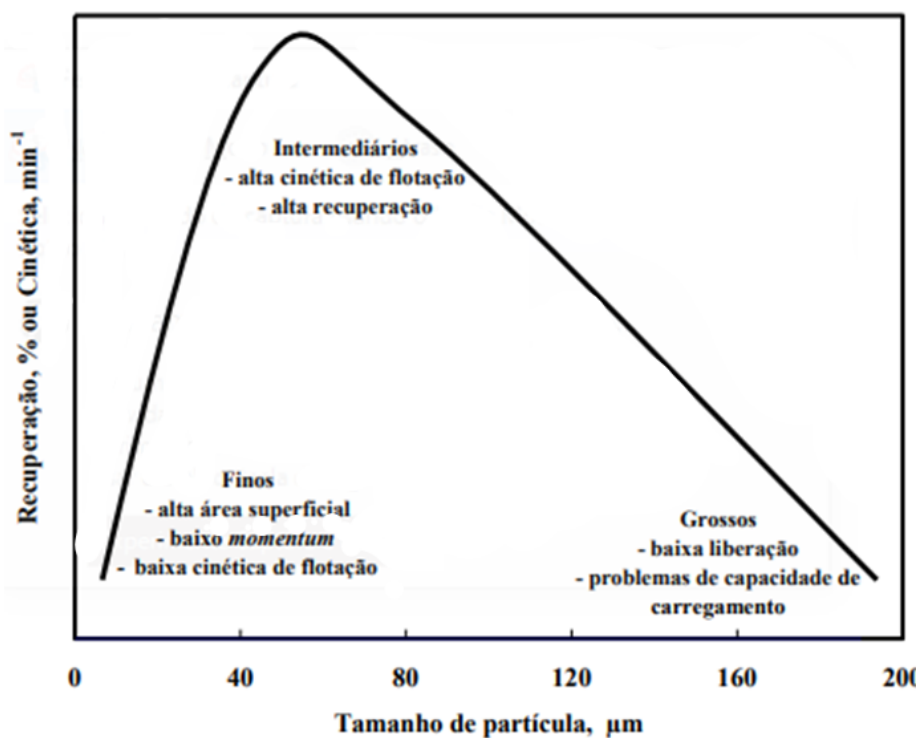
3.5 Influência do Tamanho das Partículas na Flotação

A granulometria é um importante parâmetro para a flotação influenciando no teor dos produtos e na recuperação deste processo. Trahar e Warren (1976) explicam que quase todos os subprocessos que ocorrem durante a flotação dependem do tamanho das partículas. De acordo com Baltar (2021), a faixa ideal para a flotação varia entre 10-20 μm até 100-150 μm , sendo que fora dessa faixa o processo perde eficiência. Entretanto, cada minério possui uma faixa de tamanho ideal para flotação a depender da sua constituição.

A Figura 5 apresenta uma curva típica que relaciona a eficiência da flotação com o tamanho das partículas. Como pode-se observar, a região composta por partículas classificadas como intermediárias (40 a 160 μm) apresentou os maiores valores de recuperação e de cinética de flotação. A respeito das partículas grossas, a baixa

flotabilidade pode estar relacionada à baixa liberação e a etapa de transporte, uma vez que pode ocorrer a ruptura do agregado partícula-bolha. Em relação a flotação das partículas finas, a elevada área superficial, o baixo momentum e a baixa cinética de flotação são responsáveis pelos menores índices de recuperação.

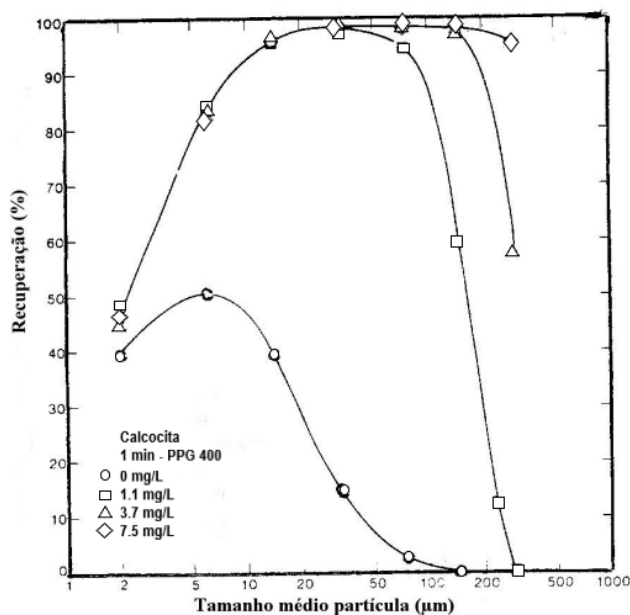
Figura 5: Relação entre a granulometria das partículas e recuperação na flotação



Fonte: Santos (2010).

Trahar (1981) realizou uma série de testes avaliando a taxa de recuperação de partículas de diferentes granulometria da calcocita variando-se a concentração do coletor (FIGURA 6). O autor observou que a flotabilidade aumenta com o aumento da concentração de coletor, e que os maiores índices de recuperação foram obtidos para os tamanhos intermediários da faixa de estudo. O autor também observou uma queda acentuada da recuperação de partículas com tamanho superior a 100 μm independente da concentração.

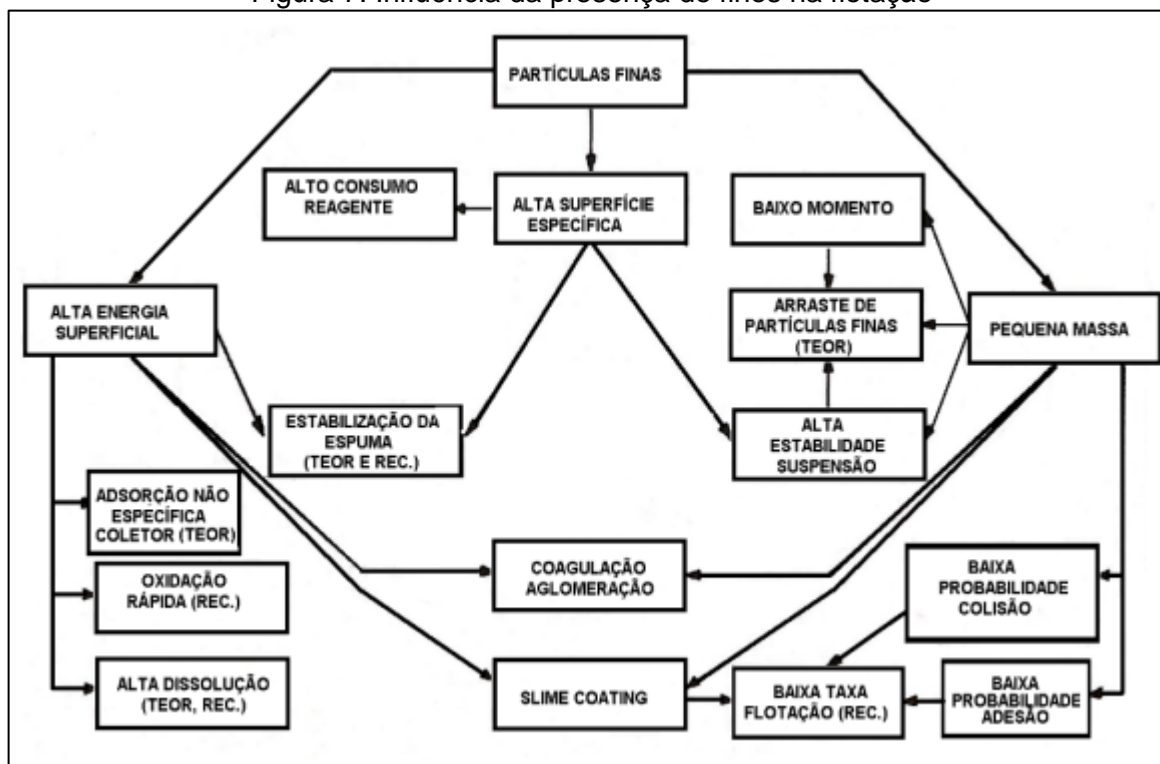
Figura 6: Flotabilidade em função da granulometria da calcocita para diferentes concentrações de coletor



Fonte: Adaptado de Trahar (1981).

Santos (2010) explica que os principais desafios observados na flotação de finos estão diretamente relacionados a pouca massa, elevada área superficial e alta energia superficial gerando no processo consequências como: baixa probabilidade de colisão e adesão entre bolha/partícula, arraste mecânico, *slime coating*, elevada adsorção de reagentes, rigidez excessiva da espuma e baixa seletividade na adsorção dos reagentes. O fluxograma da Figura 7 relaciona as propriedades das partículas finas com as dificuldades encontradas no seu beneficiamento.

Figura 7: Influência da presença de finos na flotação



Fonte: Fuerstenau (1980) adaptado e citado por Nogueira (2019)

O arraste hidrodinâmico é um fenômeno caracterizado pelo transporte de partículas pelo fluxo turbulento, independente do caráter hidrofílico ou hidrofóbico das partículas. Santos (2010) relaciona este problema principalmente as partículas ultrafinas (menores que 10 μm) que por possuírem menor massa são arrastados mais facilmente durante o processo de flotação.

O *slime coating* refere-se ao recobrimento de partículas maiores por partículas finas sendo controlado por forças intermoleculares similares aquelas das interações entre o sistema bolha/partícula (SANTANA, 2007). Este fenômeno ocorre devido à alta energia superficial das partículas associado à sua pequena massa promovendo o processo de agregação entre partículas de diferentes tamanhos que interferem na recuperação e na seletividade do processo de flotação. Baltar (2021) explica que o *slime coating* pode ocorrer em três situações diferentes:

- Partícula finas e grossas com cargas superficiais opostas que se atraem por forças eletrostáticas,
- Sistema composto por partículas finas e grossas próximas ao ponto isoelétrico possibilitando o recobrimento superficial;

- c) Sistema composto por partículas hidrofobizadas pela ação de surfatantes, em que o recobrimento se dá pela ação de forças hidrofóbicas.

A seletividade da flotação refere-se a diferença de flotabilidade entre ganga e mineral-minério. A presença de finos afeta a seletividade do sistema, uma vez que essas partículas apresentam maior quantidade de arestas, quinhas e imperfeições gerando pontos de maior reatividade da superfície mineral, o que pode resultar na adsorção não seletiva dos reagentes.

O elevado consumo de reagentes é outro problema na flotação de minerais finos. Isso se deve a maior área superficial e a presença de sítios reativos resultando num alto consumo dos coletores por essas partículas. Uma polpa contendo grande quantidade de partículas finas pode inviabilizar a flotação das partículas maiores devido à escassez de moléculas do coletor, uma vez que as partículas finas tendem consumir grande parte do coletor disponível no sistema.

A rigidez da espuma também é afetada pela presença de partículas finas no sistema. De acordo com Baltar (2021), os finos aumentam a viscosidade da água existente entre as bolhas reduzindo a velocidade de escoamento da espuma. Além disso, os finos recobrem a superfície das bolhas, tornando-as mais rígidas, resistentes e volumosas. Esta presença ainda cria uma barreira dificultando a adesão das partículas maiores e impede o colapso das bolhas dificultando o bombeamento e filtragem do produtos.

Além dos aspectos já citados, o desempenho da flotação de partículas finas pode ser atribuído a baixa cinética de flotação resultado da baixa probabilidade de colisão entre bolhas e partículas finas (menores diâmetros). Por serem menores e apresentarem pequena quantidade de movimento, tendem a acompanhar o fluxo de água, dificultando o colisão entre a bolha e a partícula

A respeito da flotabilidade de partículas grossas, a baixa recuperação pode ser atribuída a etapa de transporte devido à alta possibilidade de ruptura do agregado partícula-bolha, devido ao tamanho, ao peso e à insuficiência de cobertura hidrofóbica das superfícies dessas partículas (RAO, 2004).

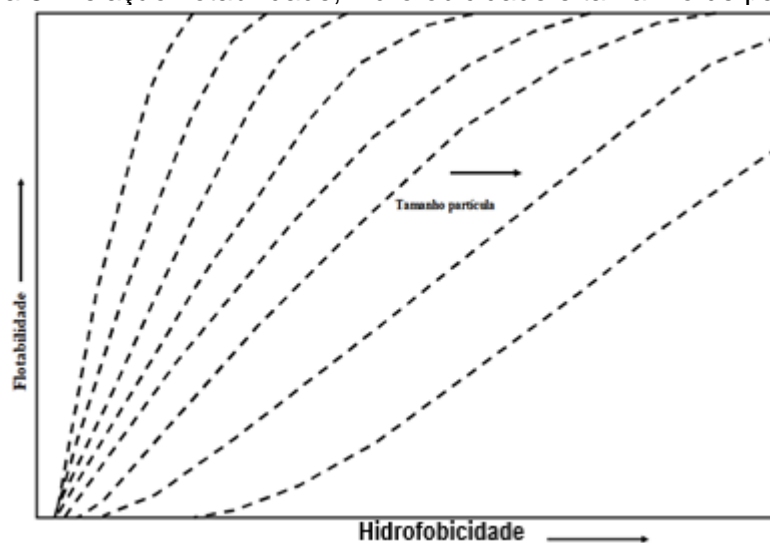
Outro aspecto importante relacionado a flotação de grossos é a estabilidade do agregado bolha/partícula que diminui à medida que a massa das partículas aumenta. Partículas maiores possuem maior dificuldade se manterem unidas às bolhas, uma vez que apresentam maior energia cinética capaz de superar a energia de fixação entre partículas/bolhas favorecendo o desprendimento das mesmas.

Os minerais mais densos possuem um limite menor de tamanho para flotação, uma vez que para ocorrer a flutuação é necessário que a densidade do sistema bolha/partícula seja menor que a densidade do líquido, o que significa que a flotação de partículas maiores precisa de bolhas de maior tamanho ou de um maior número de bolha para cada partícula (BALTAR, 2021).

Lima (2010) verificou que a eficiência de colisão e coleta, de forma geral, cai drasticamente na flotação de partículas acima de 300 μm . Esse autor afirmou que as mesmas forças responsáveis pela colisão e agregação entre bolha/partícula podem romper a estabilidade do agregado.

Baltar (2021) destaca para o processo de flotação de grossos, a importância de diminuir a turbulência do meio e de aumentar o tamanho das bolhas e a hidrofobicidade das superfícies. Trahar (1981) estudou a relação entre flotabilidade, hidrofobicidade e o tamanho das partículas de uma variedade de minerais como: esfalerita, galena, pirita e quartzo. O autor observou, ao comparar o mesmo valor de flotabilidade para sistemas constituídos por partículas de diferentes tamanhos, que com o aumento do tamanho das partículas tem-se uma queda na flotabilidade e atribuiu esse fenômeno a dois fatores: o primeiro que se refere que o aumento de granulometria requer num aumento do grau de hidrofobicidade do sistema e o segundo referindo-se que os finos reagem rapidamente e desproporcionalmente com o coletor, levando a um recobrimento superficial incompleto nas partículas grosseiras dificultando a flotação. No gráfico da Figura 8 o autor relaciona a flotabilidade do sistema com o grau de hidrofobicidade e tamanho de partícula.

Figura 8: Relação flotabilidade, hidrofobicidade e tamanho de partícula



Fonte: Adaptado de Trahar (1981)

3.6 Alternativas para Tratamento de Partículas Finas

Partículas finas, normalmente, são classificadas como a fração do minério, a partir da qual o processo de flotação perde eficiência (TRAHAR, 1981). Para aumentar a recuperação desta fração do minério, algumas alternativas podem ser adotadas, tais como: como aumento de concentração do coletor e do tempo de permanência, diminuição do tamanho de bolhas e/ou uso de dispersantes.

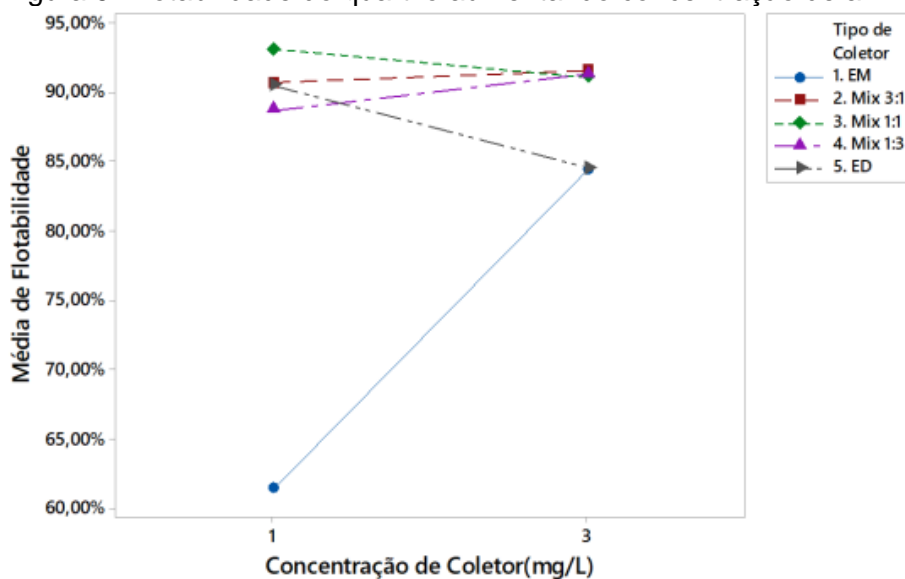
3.6.1 Aumento da concentração do coletor

As partículas finas possuem elevada área superficial e maior energia livre de superfície o que implica em um maior consumo do reagente. Dessa forma, uma alternativa para aumentar a recuperação de sistemas compostos por partículas finas é aumentar a concentração do reagente coletor favorecendo a densidade de adsorção

No caso da flotação de partículas finas de quartzo com aminas, o aumento da concentração do coletor deve ser observado algumas características do reagente tais como valor da concentração micelar crítica (CMC), espumação excessiva e o custo do reagente.

Nogueira (2021) realizou um estudo em microflotação de quartzo e verificou que, em geral, o aumento da concentração do coletor e da mistura coletores significou em aumento na flotabilidade do mineral, como apresentado na Figura 9. As exceções para tal tendência foi observada para os reagentes Mix 1:1 (50% etermonoamina e 50% eterdiamina) e somente eterdiamina e a autora atribui essa queda a possível formação de hemicelas, hidrofílicando novamente a superfície do quartzo.

Figura 9: Flotabilidade do quartzo aumentando concentração de amina



Fonte: Nogueira (2021)

3.6.2 Aumento do tempo de permanência

O tempo de permanência das partículas dentro da célula de flotação é outro parâmetro que pode ser modificado. Partículas finas com baixa cinética de flotação necessitam de maior tempo de flotação, em contrapartida estão mais sujeitas ao arraste.

Mazon (2006) realizou testes de flotação reversa minérios de ferro em colunas e identificou que ao diminuir os tempos de residência obteve-se melhores índices de recuperação, este resultado foi notado principalmente nas frações finas do mineral-minério, que pelo tempo excessivo era arrastado para o rejeito.

3.6.3 Diminuição do tamanho das bolha

Bolhas menores apresentam área superficial maior por volume, aumentando a cinética de coleta transportando maior quantidade de partículas por volume de ar. Vieira (2005) verificou em sua revisão de literatura que a diminuição do tamanho da bolha melhorou a eficiência de coleta tanto das partículas grossas quanto das finas.

Seger (2019) apesar de citar que o aumento da área superficial das bolhas aumenta a eficiência de coleta das partículas, adverte que bolhas menores possuem menor capacidade de carregamento e também menor velocidade de ascensão uma vez que a bolha pode ficar presa na corrente gerada pelo agitador inviabilizando a ascensão da mesma com a partícula, o que resulta na diminuição do concentrado obtido. O ideal é a utilização de tamanhos de bolhas variados, garantindo que as partículas mais grosseiras também consigam ser carregadas.

3.6.4 Uso de dispersante

Chaves (2018) define dispersantes como reagentes orgânicos ou inorgânicos que são capazes de individualizar as partículas minerais agregadas para posterior separação, normalmente utilizados em condições onde se tem muitos finos e/ou lamas.

Dessa maneira, o uso de dispersantes pode favorecer a flotabilidade de partículas finas, evitando o fenômeno do *slime coating*, impedindo que os finos recubram a superfície dos minerais de maior granulometria e sejam flotados incorretamente ou impedindo que os grossos sejam coletados. Alguns dispersantes são: metassilicato de sódio, metafosfato de sódio, poliacrilato de sódio e a carboxi metil celulose. (CHAVES, 2018).

Totou *et.al.* (2011) realizou testes de dispersão em minério de ferro utilizando os dispersantes: hidróxido de sódio, hexametáfosfato de sódio, silicato de sódio, metassilicato de sódio e poliacrilato de sódio. Em seu trabalho, o autor conclui que o uso desses tipos de reagentes favorece a seletividade do processo, no entanto ainda cita que apesar do metassilicato e poliacrilato serem eficientes como dispersantes eles provocam a depressão do quartzo, o que diminui o teor de ferro no concentrado. O

autor salienta que o hidróxido de sódio oferece uma excelente opção visto que pode atuar também como controlador de pH e dispersante simultaneamente. De forma geral, portanto, os resultados mostram a importância da dispersão, no entanto a escolha dos reagentes deve ser feita com atenção para não haver a depressão do quartzo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa. Todos os experimentos foram realizados nos Laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG e da UFOP.

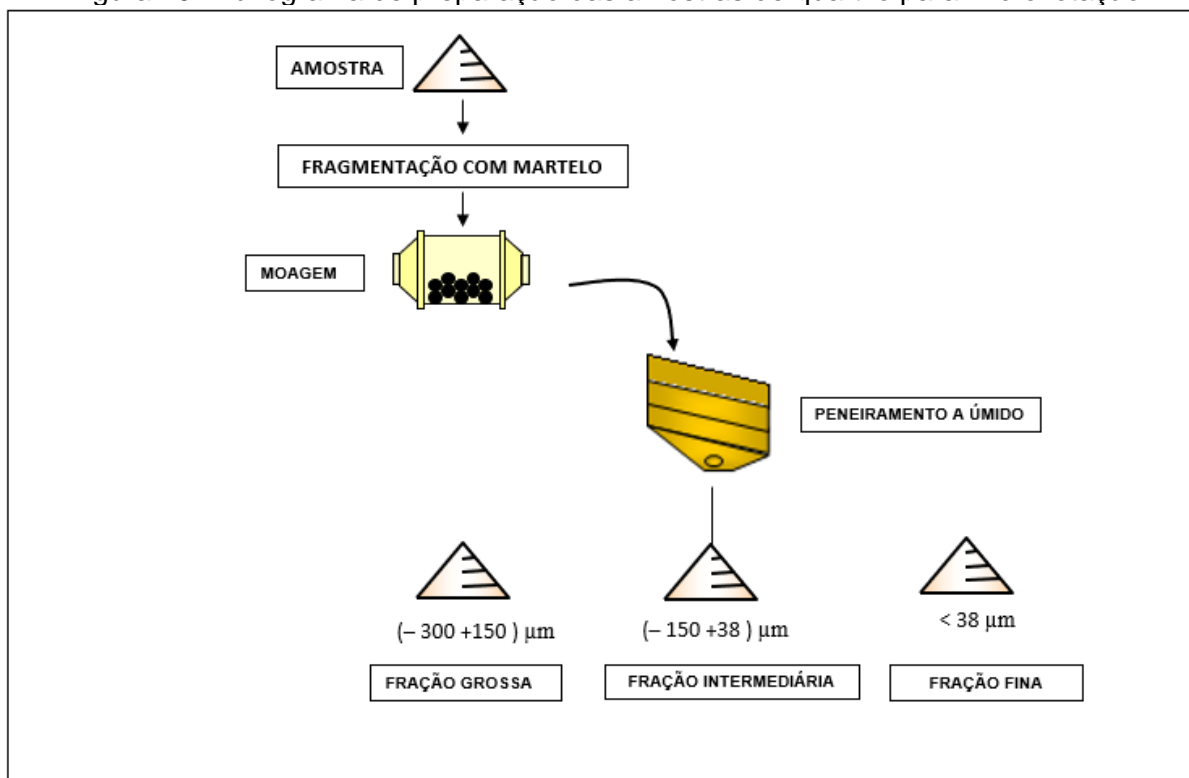
4.1 Preparação da Amostra de Quartzo

A amostra de quartzo proveniente da região do Quadrilátero Ferrífero passou por etapas de cominuição e classificação para adequação da mesma nas três faixas granulométricas de interesse para este estudo. Foi definido como faixa fina a granulometria ($<38 \mu\text{m}$), faixa intermediária ($+38 -150 \mu\text{m}$) e faixa grossa ($+150 -300 \mu\text{m}$).

Para a preparação da amostra, inicialmente fragmentou-se a amostra com o auxílio de um martelo. Em seguida, realizou-se uma moagem utilizando um moinho de porcelana. Após a etapa de cominuição, realizou-se o peneiramento a úmido da amostra e a classificação da mesma nas três faixas granulométricas de interesse e por último homogeneizou-se as amostras de cada faixa granulométrica e separou-se alíquotas de 3 g de quartzo para realização dos experimentos de microflotação.

Na Figura 10 está apresentado o fluxograma referente a preparação da amostra de quartzo.

Figura 10: Fluxograma de preparação das amostras de quartzo para microflotação



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Análise de Difratomia de Raios-X

A caracterização mineralógica da amostra foi realizada utilizando difratometria de raios – X através do método do pó total. O difratômetro utilizado pertence à Universidade Federal de Minas Gerais, cujo modelo é o Empyrean da PANalytical (radiação Cu-K α com $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) e cristal monocromador de grafita.

4.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada através de um peneiramento a úmido, utilizando peneiras com aberturas compreendidas entre os tamanhos de 300 μm e 38 μm . Já a distribuição de tamanho da fração da amostra inferior a 38 μm , foi determinada por um granulômetro a laser, CILAS 1064, realizado na Universidade Federal de Ouro Preto.

4.4 Análise de Densidade

A densidade real foi medida através de um picnômetro a gás do tipo ULTRAPYC 1200, da marca Quantachrome. Esta análise foi realizada na Universidade Federal de Ouro Preto.

4.5 Reagentes Utilizados

Para execução dos experimentos de microflotação foram utilizados os reagentes apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Reagentes utilizados nos experimentos de microflotação

FUNÇÃO	REAGENTE	IDENTIFICAÇÃO	FABRICANTE
Coletor	etermonoamina	Flotigam EDA	Clariant
Regulador de pH	HCl (37%)	Ácido clorídrico	Fmaia
	NaOH	Hidróxido de sódio	Neon

Fonte: Aatoria própria (2022)

4.5.1 Preparação da solução de Flotigam – EDA

A solução do reagente coletor Flotigam EDA foi preparada na concentração 1 g/L. As soluções utilizadas nos experimentos de microflotação, cujas concentrações estão apresentadas na Tabela 5, foram obtidas a partir da diluição da solução com maior concentração (“solução mãe”).

Tabela 5: Concentração de coletor utilizado nos experimentos de microflotação

Teste	Concentração (mg/L)
1	1
2	5
3	10

Fonte: Aatoria própria (2022)

4.5.2 Preparação das soluções reguladoras de pH

As soluções de hidróxido de sódio (NaOH) foram preparadas nas seguintes concentrações: 1% p/v, 5% p/v e 10% p/v.

- a) Pesou-se a massa de hidróxido de sódio para cada concentração (1 g, 5 g e 10 g) em um béquer limpo e seco. Adicionaram-se 30 mL de água destilada e com auxílio de um agitador magnético a solução foi homogeneizada até a solubilização completa;
- b) Transferiu-se a solução do béquer para um balão volumétrico de 100 mL completando o volume com água destilada.

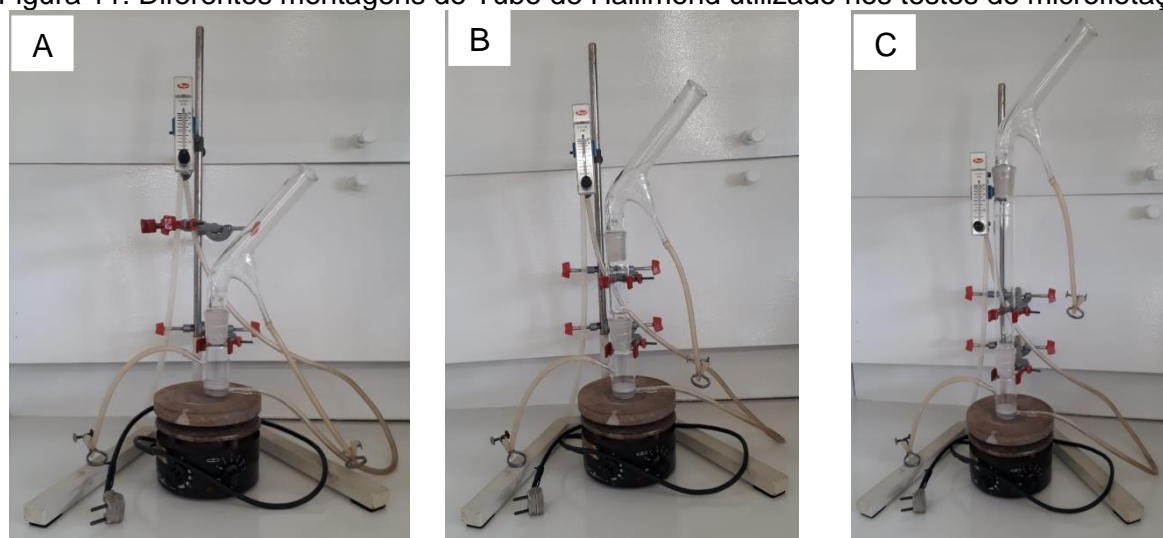
As soluções de ácido clorídrico (HCl) foram preparadas nas concentrações 0,5% v/v; 1% v/v; 5% v/v e 10% v/v.

- a) Com auxílio de uma pipeta volumétrica, mediu-se o volume de ácido clorídrico referente a cada concentração (0,5 mL; 1 mL; 5 mL e 10 mL);
- b) Transferiu-se o volume de ácido medido para um béquer contendo 30 ml de água destilada e homogeneizou-se a solução com auxílio de um agitador magnético;
- c) Transferiu-se a solução do béquer para um balão volumétrico de 100 ml, completando o volume do balão com água destilada.

4.6 Experimentos de Microflotação

Os testes de microflotação foram divididos em três baterias. A primeira bateria foi feita com objetivo de quantificar o arraste hidrodinâmico das partículas com diferentes granulometrias variando a montagem do tubo de Hallimond com o uso de extensores com diferentes alturas que alteram a distância entre a placa porosa e a abertura da saída do flotado, conforme apresentado na Figura 11. A montagem (A) apresenta o tubo de Hallimond sem extensor (volume final - 180 ml); a montagem (B) apresenta o tubo adaptado com um extensor médio de 8,6 cm de altura (volume final - 250 ml) e a montagem C apresenta o tubo adaptado com o extensor grande de 23 cm de altura (volume final - 380 ml).

Figura 11: Diferentes montagens do Tubo de Hallimond utilizado nos testes de microflotação



Fonte: Autoria própria (2022)

Na 2ª Bateria variou-se a concentração do coletor e na 3ª Bateria avaliou-se a influência do tempo de coleta para as diferentes granulometrias testadas. Na Tabela 6 estão apresentadas as condições experimentais de cada etapa desta pesquisa.

Tabela 6: Sequência dos experimentos de microflotação

Bateria	Condições
1	Sem uso de reagentes Uso de extensor de diferentes alturas Granulometria: fino, intermediário e grosso Tempo de condicionamento: 1 minuto pH: 10,5 Tempo de coleta: 1 minuto
2	Variação da concentração do coletor: 1, 5 e 10 mg/L Uso de extensor grande Granulometria: fino, intermediário e grosso Tempo de condicionamento: 1 minuto pH: 10,5 Tempo de coleta: 1 minuto
3	Variação do tempo de coleta: 1, 3 e 5 minutos Uso de extensor grande Granulometria: fino, intermediário e grosso Tempo de condicionamento: 1 minuto Concentração de coletor; 10 mg/L pH: 10,5

Fonte: Autoria própria (2022)

Os experimentos de microflotação foram realizados seguindo as etapas descritas a seguir:

- a) Preparou-se a solução do coletor na concentração pré-estabelecida pelo teste;
- b) Regulou-se a solução do coletor em pH=10,5;
- c) Adicionaram-se ao Tubo de Hallimond, para cada condição analisada, 3 g de quartzo e 20 ml da solução do coletor, condicionando o sistema, sob agitação constante por 1 minuto;
- d) Completou-se o volume do Tubo de Hallimond com a solução do coletor preparada e na concentração referente ao teste (pH=10,5);
- e) Abriu-se a válvula de gás nitrogênio, mantendo a vazão do gás entre 70 ml/L e 80 ml/L;
- f) Flotou-se em cada condição (concentração de coletor/ granulometria) pelo tempo pré-estabelecido;

- g) As frações afundadas e flotadas foram filtradas, secas à temperatura entre 81 e 87 °C e pesadas;

A flotabilidade de cada teste foi calculada utilizando a Equação 1:

$$Flotabilidade = \frac{M_{flotado}}{M_{flotado} + M_{afundado}} \times 100 \quad (1)$$

Todos os testes foram realizados em duplicatas admitindo-se um desvio máximo de 5% entre os resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

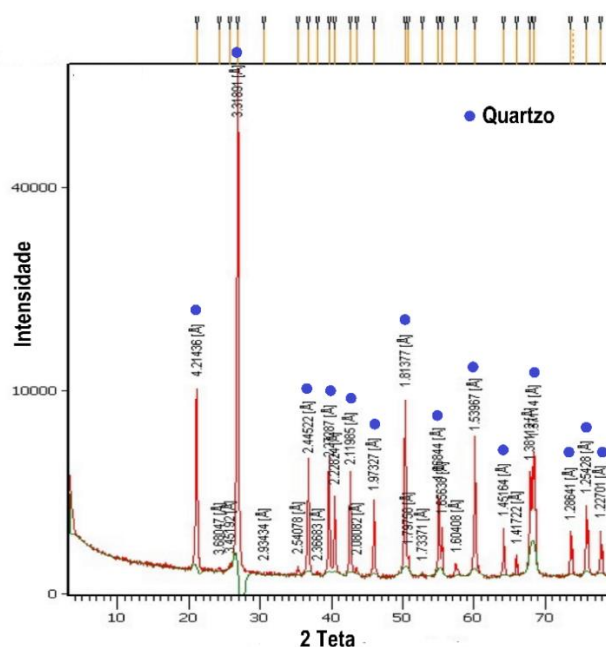
Neste capítulo estão apresentados os resultados experimentais obtidos neste pesquisa.

5.1 Caracterização da Amostra de Quartzo

O resultado da difração de raios-X foi analisado comparando-se os valores das intensidades dos picos e das distâncias interplanares com amostras de referência, utilizando os padrões do banco de dados do PDF2-ICDD do International Centre for Diffraction Data

A Figura 12 apresenta o resultado da análise de difratometria da amostra de quartzo utilizado nos testes do presente trabalho. Observou-se o elevado grau de pureza da amostra, demonstrando seu potencial para a realização dos testes de microflotação no Tubo de Hallimond.

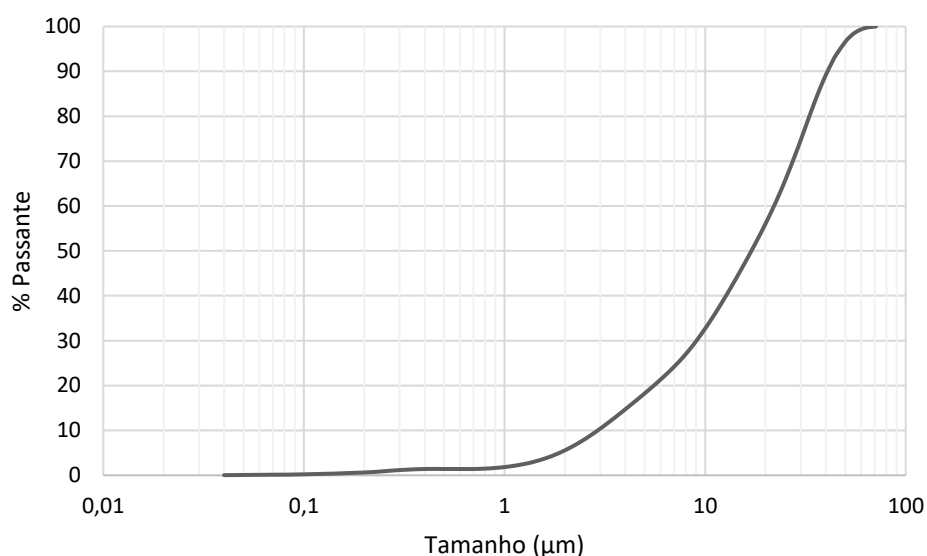
Figura 12: Difratograma de raios - X da amostra de quartzo



5.2 Análise Granulométrica

O gráfico da Figura 13 apresenta a distribuição granulométrica da fração fina (-38 μm) da amostra de quartzo que apresentou tamanho médio igual a 19,84 μm , P_{80} igual a 33,09 μm e P_{50} igual a 17 μm . O percentual da fração menor que 10 μm foi igual a 32,62%.

Figura 13: Distribuição granulométrica da fração fina da amostra de quartzo



5.3 Análise de Densidade

As medidas de densidade foram realizadas a 19,8 $^{\circ}\text{C}$, utilizando um porta amostra com 19,36 cm^3 , tempo de equilíbrio automático, pressão alvo igual a 17 psi e tempo de purga igual a 4 minutos. Determinou-se a densidade como sendo a média de 3 medidas e o valor encontrado foi igual a 2,6916 g/cm^3 .

5.4 Experimentos de Microflotação

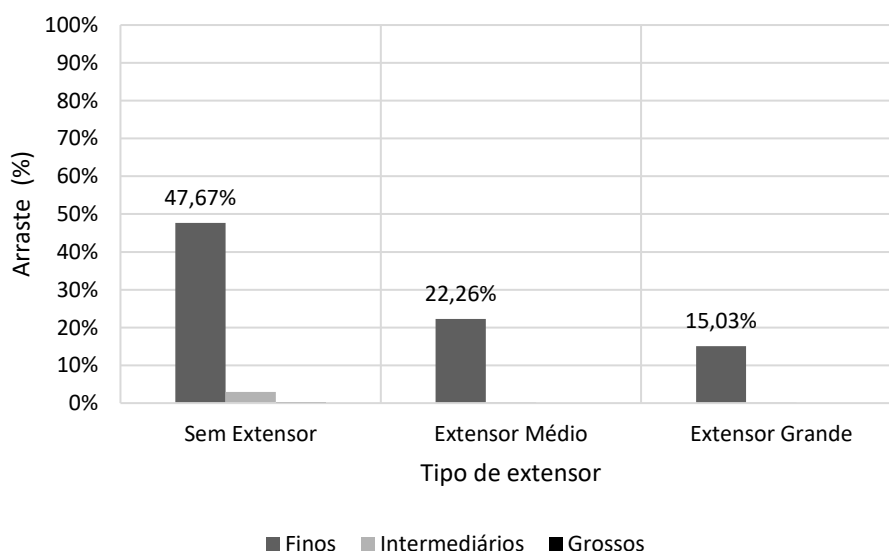
No gráfico da Figura 14 estão apresentados os valores de flotabilidade do quartzo em função da granulometria das partículas e do tamanho do extensor. Como esses experimentos foram realizados na ausência de reagentes coletores pode-se afirmar que os valores encontrados são resultado do arraste mecânico das partículas pelo fluxo de bolhas do gás nitrogênio.

Observou-se que a granulometria foi um parâmetro que interferiu de forma significativa no arraste hidrodinâmico. As partículas classificadas como finas, por terem menor tamanho e, portanto, menor massa apresentam maior tendência de serem arrastadas pelo fluxo hidrodinâmico do sistema sendo coletadas como produto flotado, mesmo sendo hidrofílicas. A maior diferença entre os valores de arraste chegou a aproximadamente 47,4 %, comparando a recuperação da fração fina e grossa sem o uso do extensor.

A análise do gráfico também permite observar que a presença do extensor minimizou o arraste hidrodinâmico, corroborando com a ideia de quanto maior o caminho a ser percorrido pelas partículas, menor a probabilidade de partículas serem arrastadas. Para a fração classificada como fina, por exemplo, a diferença de flotabilidade variou em 32,6% entre experimento realizado sem extensor em relação aquele com extensor grande.

Em relação as partículas classificadas como grossas, foi possível observar que essa fração não sofreu o efeito do arraste hidrodinâmico, independente da configuração do tubo de Hallimond.

Figura 14: Arraste das partículas de quartzo em função da granulometria e da configuração do tubo de Hallimond



Fonte: Autoria própria (2022)

Os dados encontrados nesta pesquisa estão de acordo com os resultados do estudo realizado por Rodrigues et al. (2011) sobre a influência da granulometria, agitação, vazão de gás e presença de extensor adaptado ao tubo no arraste de partículas de quartzo. Esses autores observaram, dentre os parâmetros estudados, que a granulometria foi o fator que resultou no maior impacto sobre o arraste (aproximadamente 20%) para a fração compreendida entre 38-75 μm .

Silva (2018) analisou o percentual de arraste hidrodinâmico de partículas de quartzo e hematita com granulometria entre 105 e 148 μm em tubo de Hallimond sem adaptação de um extensor. A autora observou que a densidade das partículas é um parâmetro que influenciou no arraste obtendo valores muito superiores para o quartzo (21,7%) em relação a hematita (0,08 - 1,16 %).

5.4.1 Flotabilidade do quartzo em função da concentração do coletor

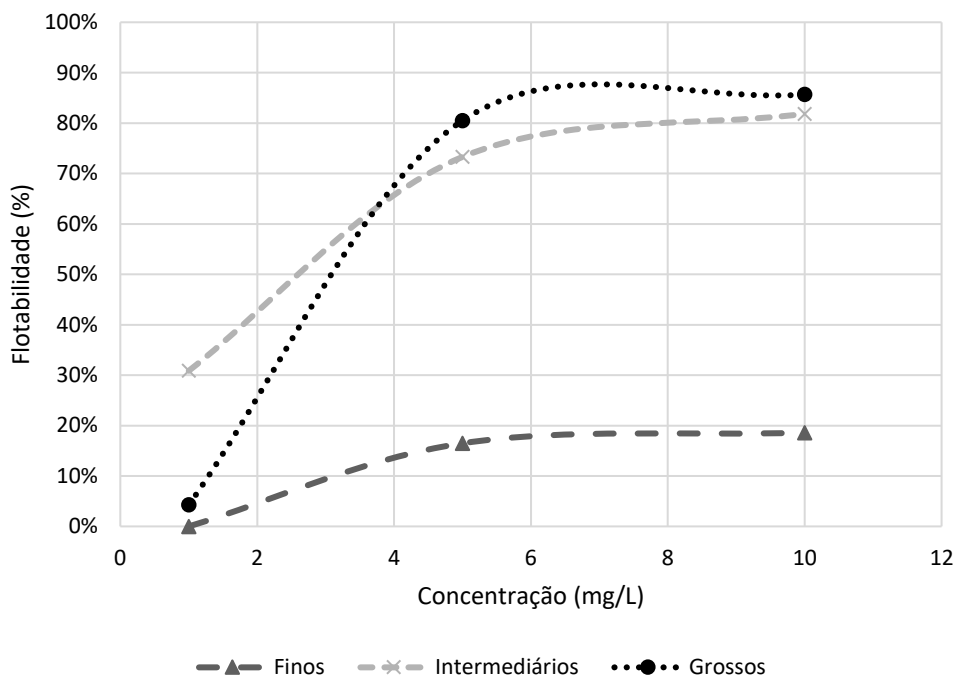
A Figura 15 apresenta os resultados da 2ª Bateria de testes realizados no tubo de Hallimond adaptado com o extensor grande (23 cm). Para eliminar o efeito do arraste mecânico, plotou-se a flotabilidade verdadeira (*“true flotation”*) do quartzo em função da granulometria das partículas e da concentração do coletor. A flotabilidade verdadeira foi estimada subtraindo-se, da massa total flotada, a massa flotada sem coletor (atribuída ao arraste mecânico).

Observou-se, de forma geral, que o aumento da concentração do coletor resultou no aumento da flotabilidade das partículas de todas as faixas granulométricas testadas. Mantendo-se constante a concentração do coletor, foi possível verificar que a faixa granulométrica classificada como fina (< 38 μm) apresentou índices de flotabilidade menores que a faixa intermediária e grossa. Esse resultado pode ser atribuído a menor densidade de adsorção do coletor, devido à maior área superficial e a maior quantidade de sítios ativos desta fração, que possuía 32% das partículas com tamanho inferior a <10 μm .

Analisando os valores de flotabilidade dos experimentos, para concentração igual a 1 mg/L, observou-se que as partículas classificadas como intermediárias apresentaram maiores valores de recuperação. A baixa flotabilidade das partículas grossas, nesta

concentração, pode ser atribuída a baixa estabilidade do agregado bolha-partícula devido ao recobrimento superficial incompleto das partículas grosseiras. Com o aumento da concentração do coletor [10 mg/L], os índices de flotabilidade das partículas grossas chegaram a 85,7%, resultado que está relacionado ao aumento da energia de adesão bolha-partícula.

Figura 15: Flotabilidade do quartzo em função da concentração do coletor

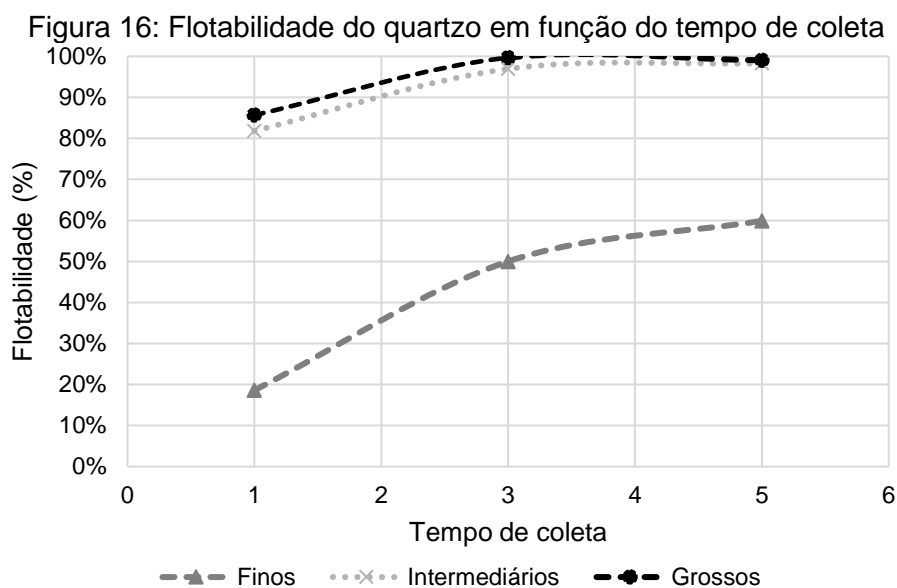


Fonte: Autoria própria (2022)

Na literatura, não há um padrão para classificação das partículas quanto ao tamanho. Entretanto, costuma-se classificar como grossas, aquelas cujo tamanho está acima da faixa adequada a flotação. De acordo com Baltar (2021), a faixa que apresenta os maiores valores de flotabilidade está compreendida entre 10-20 μm à 100-150 μm , podendo variar de acordo com as características dos minerais. Analisando os dados obtidos, observou-se que a faixa classificada, nesta pesquisa, como grossa (+150 - 300 μm) apresentou altos índices de recuperação, o que significa que a flotação do quartzo pode ser realizada de forma eficiente até 300 μm .

5.4.2 Flotabilidade do quartzo em função do tempo de coleta

A Figura 16 apresenta os resultados da 3ª Bateria de testes que foram realizados variando a granulometria e o tempo de flotação entre 1, 3 e 5 minutos, usando uma concentração de coletor igual a 10 mg/L.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando os dados obtidos, foi possível observar que para a faixa granulométrica classificada como fina ($< 38 \mu\text{m}$) o aumento do tempo de flotação de 1 para 5 minutos resultou em um aumento de flotabilidade de 41,3%. Este resultado pode ser atribuído ao aumento do tempo de permanência das partículas no tubo de Hallimond, que compensou a baixa cinética de flotação das partículas compreendidas nesta faixa de tamanho. A baixa cinética de flotação está relacionada a baixa probabilidade de colisão entre bolhas e partículas finas que apresentam pequena quantidade de movimento e tendem a acompanhar o fluxo de água, dificultando a colisão com as bolhas.

Em relação as partículas intermediarias e grossas, observou-se que as curvas de flotabilidade apresentaram comportamento semelhante. As partículas destas faixas de tamanho atingiram valores próximos a flotabilidade máxima após 3 minutos de coleta.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos testes de microflotação foi possível compreender como a granulometria das partículas influenciam no arraste hidrodinâmico, consumo de reagente e na cinética de flotação do quartzo.

Em relação ao arraste hidrodinâmico, foram observados elevados valores para a faixa granulométrica fina. O uso de extensores minimizou o arraste mecânico destas partículas e a adaptação do tubo de Hallimond com extensores de diferentes alturas deve ser sempre avaliada antes do início de testes de microflotação para que seja mensurada apenas a flotação verdadeira "*true flotation*".

Em relação à concentração do coletor Flotigam-EDA, observou-se que o aumento da concentração resultou no aumento da flotabilidade do mineral em todas as faixas analisadas. A faixa granulométrica fina, conforme esperado, apresentou índices de flotabilidade menores que a faixa intermediária e grossa, resultado da baixa densidade de adsorção do coletor, devido à maior área superficial e a maior quantidade de sítios ativos desta fração. Comprovou-se também a importância da hidrofobicidade para a flotabilidade das partículas grossas, uma vez que com o aumento da concentração do coletor, os índices de flotabilidade desta fração aumentou de forma significativa.

Em relação ao tempo de flotação, concluiu-se que este é uma variável de extrema importância principalmente na recuperação de partículas finas que apresentam baixa cinética de flotação. A velocidade de flotação aumentou com o tamanho das partículas dentro da faixa das faixas granulométricas analisadas devido a maior probabilidade de colisão entre bolhas-partículas.

Por fim, e ao contrário do esperado, não foi observada a diminuição da flotabilidade das partículas classificadas como grossas, indicando que para o mineral quartzo a fração compreendida entre (+150 -300) μm está dentro do limite adequado da microflotação. Esta consideração foi feita a partir de uma amostra pura de quartzo, entretanto a limitação da flotação em granulometrias superiores a este tamanho, está relacionada ao grau de liberação do minério em que o quartzo se encontra.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Maria. **Clatratos na flotação catiônica reversa de minérios de ferro**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.
- ALBINO, Kelly. **Influência do comprimento da cadeia hidrocarbônica das aminas na flotação reversa de itabirito**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mineral. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2020.
- ANDRADE, Wellington. **Beneficiamento de minério de ferro: A importância da caracterização tecnológica na definição de rota de processo**. 2018. 45 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Engenharia de Minas. Faculdade Presidente Antônio Carlos. 45p. Conselheiro Lafaiete. 2018.
- 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, Carlos. **Flotação: Em nova abordagem**. Recife – Ed. UFPE. 537p. 2021.
- CARVALHO, Pedro; SILVA, Marcelo; RAMALHO, Rocio; MOSZKOWICZ, Jacques. **Minério de Ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.
- CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. **Flotação**. In: **Tratamento de Minérios**. 6 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.10, p405-459.
- FILIPPOV, L.O., SEVEROV, V. V., FILIPPOVA, I. V. **An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation**. In: International Journal of Mineral Processing, 127, p62–69, 2014.
- FUERSTENAU, D.W. **Fine particle flotation**. In: SOMASUNDARAM, P. Fine Particles Processing, New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, c.35, p. 669-705. 1980.
- LIMA, Neymayer. **Avaliação do processo de flotação para diferentes frações granulométricas**. 2010. 160 f. Tese (Doutorado) – Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

MAMEDE, Carlos; LIMA, Neymayer. **Desenvolvimento de estudo sobre coletores eterdiamina e etermonoamina na flotação catiônica reversa de minérios de ferro**. Redução de Minério de Ferro & Tecnologia Mineral. Belo Horizonte. 2014.

MATOS, Vanderson. **Seletividade de reagentes na flotação reversa de minério de ferro**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

MAZON, Ricardo. **Efeito do tempo de residência sobre a recuperação metálica da flotação colunar reversa de minério de ferro**. 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Tratamento de Minérios. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2006.

NOGUEIRA, Francielle. **Agregação hidrofóbica aplicada ao beneficiamento de finos de minério de ferro**. 2019. 132 f. Tese (Doutorado) – Tratamento de Minérios. Universidade Federal de Ouro Preto. 132p. Ouro Preto. 2019.

NOGUEIRA, Stephânia. **Efeitos sinérgicos da mistura de reagentes no desempenho da flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2021. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2021.

PORFIRO, Delciane. **Nanotubos de carbono em associação com coletores na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2019. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia Mineral. UFMG. Belo Horizonte. 2019.

RAO, S. R. **Surface Chemistry of froth flotation: Fundamentals**. 2 Ed. Montreal. Kluwer Academic Plenum Publisher, v.1, p. 362, 2004.

RODRIGUES, T. S.; RODRIGUES, O. M. S.; NOVAIS, L. R.; PEREIRA, C. A.; PERES, A.E. C. **Quantificação de arraste hidrodinâmico na microflotação**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios & Metalurgia Extratita – ENTMME, 24., 2011, Salvador. Anais. p. 355-35.

ROSIÉRE, Carlos; JUNIOR, Farid. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma visão geral e discussão**. Revista Geonomos 8 (2). p 27-43. 2013.

SANTANA, Ricardo. **Análise da influência do tamanho da partícula na flotação da apatita em coluna**. 2007. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SANTOS, Everton. **Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da Mina do Pico/MG por flotação em coluna**. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.

SEGER, Marco. **Estudos de separação de partículas grossas de quartzo por flotação**. 2019. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2019.

SILVA, Letícia. **Comparação de técnicas de microflotação: tubo de Hallimond e célula de Fuerstenau**. 2018. 64 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Tratamento de Minérios. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2018.

SIVAMOHAN, R., 1990. **The problem of recovering very fine particles in mineral processing - A Review**. International Journal Mineral Processing; 28: 247-288.

Trahar, W. J., 1981. **A rational interpretation of the role of particle size in flotation**. International Journal of Mineral Processing 8: 289-327.

Trahar, W.J.; Warren, L. J., 1976. **The flotability of very fine particles – A review**. International Journal Mineral Processing 3(2), 103-131.

TOTOU, Adriano; PEREIRA, Carlos; MACHADO, Philipe; BALTAR, Carlos. **Efeito da dispersão em polpas de minérios itabiríticos**. Revista Escola de Minas. Ouro Preto, 64(2), 227-232. 2011.

VIEIRA, Ana Maria. **Efeito da granulometria na flotação de quartzo**. 2005. 167 f. Tese (Doutorado) – Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2005.