

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

**INFLUÊNCIA DO USO DE CODEPRESSORES NA FLOTAÇÃO CATIONICA
REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO**

Aluno: Paula Oliveira Lacerda

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

Co-orientador(a): Me. Maria Auxiliadora Mendes Aguiar

BELO HORIZONTE

Novembro 2017

Paula Oliveira Lacerda

**INFLUÊNCIA DO USO DE CODEPRESSORES NA FLOTAÇÃO CATIONICA
REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Minas, da Universidade
Federal de Minas Gerais - UFMG, como requisito
parcial para obtenção do título de graduação.

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

Co-orientador(a): Me. Maria Auxiliadora Mendes
Aguiar

BELO HORIZONTE

Novembro 2017

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus que me guiou nessa caminhada, pelas bênçãos e forças concedidas.

Às minhas orientadoras, Andréia Bicalho Henriques e Maria Auxiliadora Mendes, pela orientação, atenção e assistência durante a preparação deste trabalho.

Aos colegas e funcionários da UFMG, em especial: Alberto, André, Matheus, Roberta e Vinicius por todo o auxílio e disponibilidade fundamentais para realização deste trabalho.

Aos meus professores do CEFET-MG, pelos ensinamentos e conhecimentos passados.

Aos amigos que fiz em Araxá, pelo companheirismo, ajuda e por ter tornado mais fácil o caminho até aqui.

Aos meus pais, Joana e Paulo, ao meu irmão, Felipe, e todos os familiares, por sempre serem presentes, pela motivação, paciência e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao Tássio, pelo companheirismo, amor e compreensão. Por me ajudar a chegar até aqui, apoiando cada decisão e acreditando na minha capacidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivos Gerais	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. Minério de Ferro	12
3.1.1. Reservas	12
3.1.2. Características dos principais minerais presentes em minérios de ferro ..	14
3.2. Beneficiamento de Minérios	17
3.2.1. Flotação	17
3.2.2. Química de Superfície	19
3.3. Flotação de Minério de Ferro.....	25
3.3.1. Flotação Catiônica reversa do quartzo.....	26
3.3.2. Reagentes.....	26
4. METODOLOGIA	34
4.1. Origem e Preparo das Amostras	34
4.2. Preparação da solução de reagentes	35
4.2.1. Preparação do coletor amina 5% p/v	35
4.2.2. Preparação do depressor amido gelatinizado 2% p/v	36
4.2.3. Preparação do codepressor GPR – 855 2% p/v	36
4.3. Microflotação	36
4.4. Potencial Zeta	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. Potencial Zeta	42
5.2. Microflotação	43
6. CONCLUSÃO	49
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Países detentores das maiores reservas de minério de ferro do mundo (JESUS, 2015).	13
Figura 3.2 - Principais países produtores de minério de ferro (JESUS, 2015).	13
Figura 3.3 - Principais estados brasileiros produtores de minério de ferro (JESUS, 2015).	14
Figura 3.4 - Países de destino do minério de ferro brasileiro (JESUS, 2015).	14
Figura 3.5 - Estrutura cristalina da hematita (BLAKE <i>et al.</i> , 1966 <i>apud</i> SILVA, 2014).	16
Figura 3.6 - Estrutura cristalina do quartzo (KORNEEV <i>et al.</i> , 1978 <i>apud</i> SILVA, 2014)	16
Figura 3.7 - Diagrama esquemático comparando as forças de atração entre moléculas na superfície e no interior de um líquido (MASSI. <i>et al</i> , 2008).	20
Figura 3.8 - Representação esquemática do ângulo de contato entre as fases líquida, sólida e gasosa em equilíbrio (MONTE E PERES, 2010).	20
Figura 3.9 - Superfícies hidrofílicas (a) apresentam ângulo de contato menores que 90°, enquanto superfícies hidrofóbicas (b) apresentam ângulos maiores que 90° (MASSI <i>et al</i> , 2008).	21
Figura 3.10 - Estrutura da dupla camada elétrica (BALTAR, 2008).	23
Figura 3.11 - Gráfico do potencial elétrico em função da distância da superfície da partícula até o seio da solução iônica (HUNTER, 1993 <i>apud</i> HENRIQUES, 2012).	24
Figura 3.12 - Desenho esquemático da molécula de amina (MARQUES, 2013).	27
Figura 3.13 - Diagrama de espécies da dodecilamina na concentração de 1×10^{-4} M (Smith and Akhtar, 1976).	28
Figura 3.14 - Desenho esquemático da adsorção de íons individuais (esquerda), formação hemimicelas (centro) e multicamada (direita) (Smith & Akhtar, 1976 <i>apud</i> Marques, 2013).	29
Figura 3.15 - Desenho esquemático da formação de micelas (Leja, 1982).	29
Figura 3.16 - A) Estrutura da amilose [polímero linear composto por D-glicoses unidas em α -(1-4)]. B) Estrutura da amilopectina [polímero ramificado composto por D-glicoses unidas em α -(1-4) e α -(1-6)]. Fonte: Adaptado de LAJOLO & MENEZES (2006) <i>apud</i> DENARDIN e SILVA (2009).	31
Figura 3.17 - Fórmula geral dos codepressores (SOUZA <i>et al.</i> , 2010 <i>apud</i> RASO, 2014).	32
Figura 4.1 - Fluxograma ilustrativo preparação da amostra de hematita.	34
Figura 4.2 - Fluxograma ilustrativo preparação da amostra de quartzo	35
Figura 4.3 - Tubo de Hallimond modificado.	37
Figura 5.1 - Potencial Zeta da hematita e quartzo em função do pH.	42
Figura 5.2 - Flotabilidade do mineral quartzo condicionado com amina em diferentes concentrações e valores de pH.	43

Figura 5.3 - Flotabilidade do mineral hematita condicionado com amina em diferentes concentrações e valores de pH.	44
Figura 5.4 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L em diferentes valores de pH.....	45
Figura 5.5 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L e amina a 10 mg/L em diferentes valores de pH.....	46
Figura 5.6 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L e codepressor (GPR -855) a 40 mg/L em diferentes valores de pH.....	46
Figura 5.7 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L, codepressor (GPR- 855) a 40 mg/L e amina a 10 mg/L em diferentes valores de pH.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.2 - Principais minerais de ferro.	15
Tabela 3.2 - Grau de substituição e tipo de amina resultante.	27
Tabela 4.1 - Reagentes utilizados.	35

RESUMO

A flotação catiônica reversa é o método de concentração mais empregado para o minério de ferro. Para esta técnica de concentração utiliza-se a amina como espumante e coletor do quartzo, o principal mineral de ganga do minério de ferro, e o amido como depressor do mineral de ferro. Nesse trabalho foram realizados testes de microflotação utilizando um novo tipo de reagente, empregado como codepressor, que atua juntamente com o amido de milho, para avaliar o efeito deste sobre a seletividade do processo de flotação catiônica reversa e determinar condições ideais para sua utilização. Os principais reagentes empregados nos estudos de microflotação foram a amina como coletor do quartzo, o amido de milho como depressor da hematita, o GPR-855 como codepressor e, hidróxido de sódio e ácido clorídrico como regulador de pH. Os testes iniciais foram feitos para determinar as condições ideais para o coletor amina, as condições encontradas foram concentração 10 mg/L e pH 9. Os demais testes foram realizados variando os valores de pH em 8; 9; 10 e 11. As concentrações dos reagentes foram determinadas com base na condição ideal encontrada para amina, sendo a concentração de amina 10 mg/L, amido 40 mg/L e codepressor 20 mg/L. As dosagens utilizadas para os reagentes foram as melhores dosagens encontradas por Raso (2014) em trabalho realizado anteriormente. A maior diferença entre as flotabilidades de quartzo e hematita, empregando o codepressor, ocorreu em pH próximo ao pH 8, onde a flotabilidade do quartzo foi de 10,56% e da hematita de 1,45%. Sendo assim, neste valor de pH a seletividade na separação entre os dois minerais também foi maior. O uso do codepressor proporcionou o aumento da seletividade na separação entre a hematita e o quartzo em pH próximo de 8 e em pH 11, quando comparados com as condições tradicionais utilizando apenas amina e amido de milho.

ABSTRACT

Reverse cationic flotation is the most commonly used concentration method for iron ore. For this concentration technique the amine is used as foaming and quartz collector, the main iron ore gangue, and the starch as iron ore depressant. In this work, micro flotation tests were performed using a new reagent type, used as a codepressor, which acts together with corn starch, to evaluate the effect of this on the selectivity of the reverse cationic flotation process and to determine the ideal conditions for its use. The main reagents used in the microflotation studies were amine as quartz collector, corn starch as hematite depressant, GPR-855 as codepressor and sodium hydroxide and hydrochloric acid as pH regulator. The initial tests were done to determine the ideal conditions for the amine collector, the conditions found were concentration 10 mg/L and pH 9. The other tests were carried out varying the pH values in 8; 9; 10 and 11. The concentrations of the reactants were determined based on the ideal condition found for amine, with the amine concentration being 10 mg/L, starch 40 mg/L and codepressor 20 mg/L. The dosages used for the reagents were the best dosages found by Raso (2014) in previous work. The greatest difference between quartz and hematite flotabilities, using codepressor, occurred at a pH close to pH 8, where quartz buoyancy was 10.56% and hematite 1.45%. Therefore, in this pH value the selectivity in the separation between the two minerals was also higher. The use of codepressor provided increased selectivity in the separation between hematite and quartz at pH close to 8 and at pH 11 when compared to traditional conditions using only amine and corn starch.

1. INTRODUÇÃO

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, possui numerosas aplicações, sendo o metal mais usado na vida do homem. O ferro é um metal muito reativo, por isso é difícil de ser encontrado puro. Habitualmente está associado ao oxigênio, formando os óxidos de ferro. Os principais minerais portadores de ferro são a hematita, magnetita, goethita e siderita.

Devido à grande procura por minérios de ferro, as jazidas com alto teor vêm se esgotando e surge a necessidade de explorar minérios com teores de ferro cada vez mais baixos.

O beneficiamento de minérios de ferro advindos de minas com altos teores é feito usando-se apenas processos cominuição e de classificação. Porém, à medida que estes minérios se tornaram mais pobres faz-se necessário o uso de processos de concentração, através de métodos gravíticos, magnéticos e a flotação, sendo a flotação o método mais utilizado dentre estes.

Sendo o quartzo o principal mineral de ganga do minério de ferro, a flotação catiônica reversa do quartzo é o método de flotação mais viável, atualmente, para o minério de ferro. A flotação catiônica reversa é feita utilizando-se a amina como coletor do quartzo e espumante, e o amido como depressor do mineral de ferro.

Como consequência da crescente demanda pelo minério de ferro e diminuição dos teores de suas jazidas, surge para a indústria mineral o desafio de tratar estes minérios pobres e a partir deles alcançar concentrados de especificações rígidas, com custos reduzidos. Para atender as necessidades da indústria mineral é preciso investir em pesquisas voltadas para a otimização de processos de concentração, de forma que sua seletividade e a recuperação de minerais de ferro permaneçam altas.

Com o intuito de otimizar a flotação catiônica reversa de minério de ferro, o presente trabalho irá avaliar o efeito sobre a seletividade deste processo ao utilizar um novo tipo de reagente, empregado como codepressor, que atua juntamente com o amido de milho. Bem como estudar as principais variáveis de processo da flotação, com o intuito de determinar as condições ideais para utilização deste codepressor.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

O trabalho proposto teve por objetivo testar um novo tipo de reagente, empregado como codepressor na flotação catiônica reversa de minério de ferro e atuando juntamente com o amido de milho, através de testes de microflotação, com o intuito de aperfeiçoar e avaliar a seletividade deste reagente no processo de flotação do minério de ferro.

2.2. Objetivos específicos

- i. Estudos de microflotação de hematita e quartzo para otimizar as principais variáveis do processo de flotação catiônica reversa de minério de ferro: dosagem de coletor, depressor e valor de pH;
- ii. Estudo de microflotação para avaliar o efeito da adição do codepressor GPR-855 na flotação catiônica reversa de minério de ferro;
- iii. Avaliar a seletividade de separação entre os minerais hematita e quartzo na microflotação utilizando o codepressor GPR-855.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Minério de Ferro

O ferro é um metal de transição de cor cinza prateado, que tem como símbolo atômico Fe, é maleável e dúctil, tem densidade específica de 7,87. É um elemento encontrado no estado sólido, quando em temperatura ambiente e que apresenta características ferromagnéticas (NASCIMENTO, 2010).

Este metal é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, cerca de 4,2% da litosfera são compostos por ferro. Por ser muito reativo, dificilmente se apresenta na forma pura. Os principais minerais que contêm ferro são: hematita $\alpha(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, magnetita (Fe_3O_4), goethita $\alpha(\text{FeOOH})$ e siderita (FeCO_3) (QUARESMA, 2001).

Os maiores depósitos de minério de ferro são constituídos pelas formações ferríferas bandadas, conhecidas como itabirito e compostas por hematita (Fe_2O_3) e sílica. Esses tipos de formações foram enriquecidas por processos geológicos que permitiram a existência de itabiritos intercalados com hematita compacta com altos teores de ferro (QUARESMA, 2001).

O minério de ferro é amplamente aplicado na indústria siderúrgica, devido a suas propriedades físicas e químicas, para a produção de aço. Em menor quantidade, é usado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas (QUARESMA, 2001).

3.1.1. Reservas

Segundos dados do DNPM as reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 190 bilhões de toneladas. Em relação às reservas mundiais, as reservas lavráveis brasileiras representam 11,9%, sendo assim o Brasil é o quarto país que mais detêm reservas de minério de ferro no mundo (Figura 3.1).

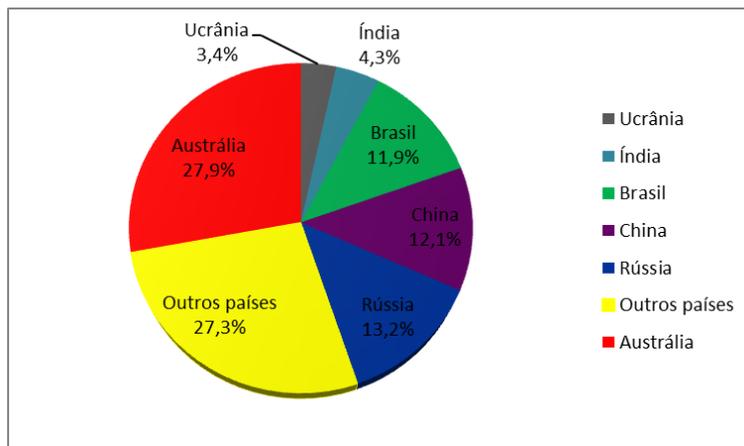


Figura 3.1 - Países detentores das maiores reservas de minério de ferro do mundo (JESUS, 2015).

Ao analisar a produção mundial de minério de ferro, que em 2014 foi de 3,22 bilhões de toneladas, o Brasil é o terceiro maior produtor do minério, ficando atrás da China e Austrália (Figura 3.2). Sua produção de 411,8 milhões de toneladas de minério representa 12,8% do que foi produzido mundialmente (JESUS, 2015).

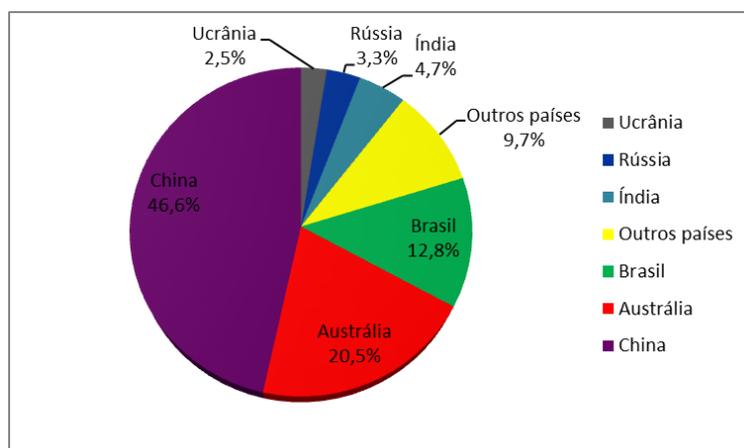


Figura 3.2 - Principais países produtores de minério de ferro (JESUS, 2015).

Minas Gerais é o principal estado produtor de minério de ferro (68,4%), seguido do Pará (29,2%) e Mato Grosso do Sul (1,2%), o que pode ser observado na Figura 3.3.

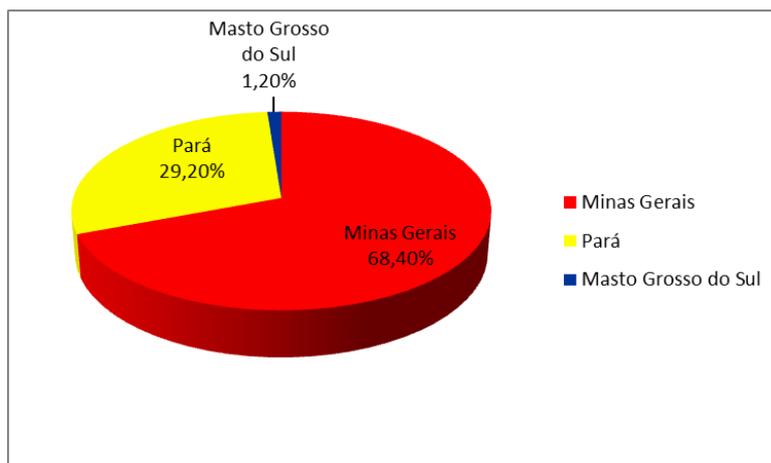


Figura 3.3 - Principais estados brasileiros produtores de minério de ferro (JESUS, 2015).

A China é o principal país importador do minério de ferro brasileiro, 52% do minério produzido no país são destinados à China (Figura 3.4). Sendo assim, as exportações brasileiras de minério de ferro dependem essencialmente da China, que além de ser nosso maior comprador, é também o maior consumidor mundial do minério de ferro.

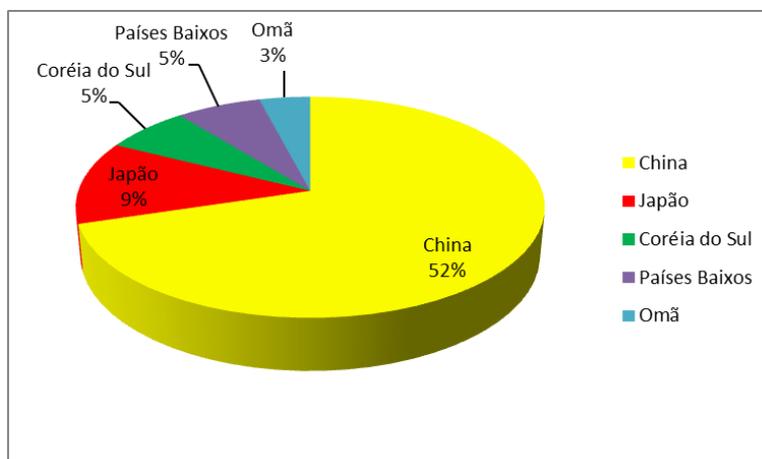


Figura 3.4 - Países de destino do minério de ferro brasileiro (JESUS, 2015).

3.1.2. Características dos principais minerais presentes em minérios de ferro

Os principais minerais portadores de ferro são apresentados na Tabela 3.1, juntamente com suas estruturas cristalinas, fórmula química, densidade e teor de ferro. Dentre os minerais de ganga comumente associados a minério de ferro, o quartzo é o

principal deles. Pelo fato de a hematita e o quartzo serem os principais constituintes do minério de ferro, estes minerais terão destaque neste tópico.

Tabela 3.1 - Principais minerais de ferro.

Nome	Sistema Cristalino	Fórmula Química	Densidade	Teor de Ferro %
Magnetita	Cúbico	FeO.Fe ₂ O ₃	4,97-4,18	72,4
Hematita	Romboédrico-hexagonal	Fe ₂ O ₃	4,9-5,3	70,0
Martita	Cúbico	Fe ₂ O ₃	4,8-5,3	70,0
Goethita	Romboédrico	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O	4,0-4,4	62,9
Limonita	Misto, principalmente goethita	2Fe ₂ O ₃ .3H ₂ O	3,6-4,0	60,0
Siderita	Romboédrico-hexagonal	FeCO ₃	3,00-3,88	48,2
Pirita	Cúbico	FeS ₂	4,95-5,17	46,6

Fonte: Yang, 1988 apud Lopes, 2009.

3.1.2.1. Hematita

A hematita (Fe₂O₃) é um óxido de ferro e o principal mineral-minério de ferro. Possui sistema cristalino hexagonal e é caracterizada pela cor cinza grafite, traço vermelho ocre, brilho metálico, possui dureza 6,5 na escala de Mohs e densidade 5,3 g/cm³ (KLEIN, 2001). É um mineral não magnético com teor de ferro de 69,94% e de oxigênio de 30,06% (DANA, 1974). Segundo Henriques (2009) a hematita pode ocorrer sob diferentes formas: hematita compacta, hematita especular, hematita porosa e ainda martita e hematita granoblástica, e pode ser encontrada em formações ferríferas bandadas (BIF) do Pré-Cambriano, associadas com goethita-limonita em cangas ou minérios oolíticos, associada com goethita, calcita e quartzo clássico e em arenitos e quartzitos ferruginosos como material de sedimentação (DETLEF, 1986 apud COUTO, 2009). A Figura 3.5 representa a estrutura cristalina da hematita.

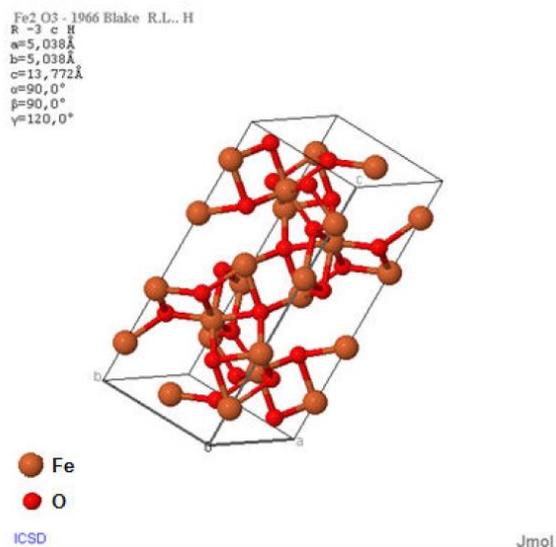


Figura 3.5 - Estrutura cristalina da hematita (BLAKE *et al.*, 1966 *apud* SILVA, 2014).

3.1.2.2. Quartzo

O quartzo é o segundo mineral mais abundante da Terra e na grande maioria dos minérios é o mineral de ganga. O quartzo (SiO₂) é composto quimicamente por 46,7% de silício e 53,3% de oxigênio, suas principais características são: densidade 2,65 g/cm³, brilho vítreo, fratura conchoidal, ausência de clivagem, sistema cristalino trigonal e dureza 7 na escala de Mohs (KLEIN, 2001). A estrutura cristalina do quartzo é apresentada Figura 3.6.

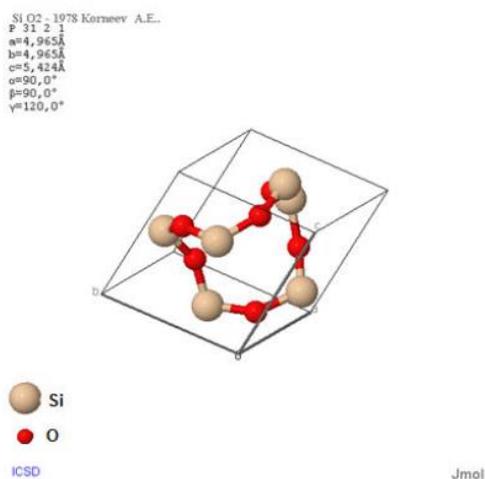


Figura 3.6 - Estrutura cristalina do quartzo (KORNEEV *et al.*, 1978 *apud* SILVA, 2014)

3.2. Beneficiamento de Minérios

O beneficiamento de minérios segundo Luz e Lins (2010) consiste de operações aplicadas aos bens minerais com o objetivo de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou forma, sem que as propriedades químicas e físicas dos minerais sejam modificadas.

Concentração significa remover a maior parte da ganga presente em grande proporção no minério, para que isso ocorra é necessário atender a três condições básicas: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica. Para se atingir a liberação mineral, o minério passa por operações de redução de tamanho, conhecidas como cominuição, e que são compostas pela britagem e/ou moagem. A separabilidade dinâmica está ligada aos equipamentos usados e a diferenciabilidade é a base da seletividade do método (LUZ e LINS, 2010 e Peres et al., 2012).

Conforme Nascimento (2010) a escolha do método de concentração de minérios de ferro depende das características físicas, químicas e mineralógicas do minério. Esta concentração pode ser realizada por vários métodos e/ ou por uma combinação entre eles, os principais aplicados na indústria para o tratamento deste minério são os métodos gravíticos, magnéticos e a flotação.

Este tópico terá como alvo a flotação, por ser o método de concentração de minério de ferro mais utilizado mundialmente e tema do presente trabalho.

3.2.1. Flotação

A flotação em espuma, ou apenas flotação, é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora as diferenças entre as várias espécies minerais no que se relacionam as suas características superficiais. O processo se desenvolve em um meio onde as fases sólida, líquida e gasosa estão presentes e participam intensamente do processo (BALTAR, 2008 e PERES et al., 2012).

A superfície de diferentes espécies minerais podem apresentar diversos graus de hidrofobicidade e a seletividade do processo de flotação se baseia nesse fato. A fase sólida presente na flotação é representada pela mistura de minerais, que podem apresentar superfície polar ou apolar. A fase líquida é a água, suas moléculas apresentam um dipolo permanente e por isso possui natureza polar. A fase gasosa

utilizada é o ar, e este é formado à base de moléculas apolares de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio (BALTAR, 2008). Desta forma, uma substância hidrofóbica pode ser caracterizada como aquela que possui superfície essencialmente apolar, tendo maior afinidade com o ar do que com a água. E uma substância hidrofílica é aquela com superfície polar, indicando maior afinidade com a água do que com o ar (PERES et al., 2012).

Portanto, a separação entre partículas hidrofílicas e hidrofóbicas pode ser feita pela da passagem de ar através de uma polpa que contém os dois tipos de espécies. Essa situação é a que ocorre no processo de flotação, assim as partículas hidrofóbicas aderem às bolhas de ar e são carregadas por elas até a superfície, onde são removidas, enquanto as partículas hidrofílicas permanecem em suspensão, com a superfície recoberta por moléculas de água (MARIA, 2009 e BALTAR, 2008).

Entretanto, muito poucos minerais são encontrados naturalmente hidrofóbicos, o que poderia limitar o uso da técnica de flotação. Para ampliar o uso da flotação, para qualquer tipo de minério, fez-se necessário o desenvolvimento de uma tecnologia que possibilitasse a manipulação das superfícies dos minerais, transformando hidrofílicas em hidrofóbicas pela adição e adsorção criteriosa de determinados reagentes, denominados coletores (BALTAR, 2008).

A utilização de substâncias conhecidas como modificadores ou reguladores, que podem ser orgânicas ou inorgânicas, é necessária para que aconteça o processo de concentração por flotação. Esses modificadores atuam de várias formas, destacando-se: ajustar o pH do sistema, ajustar o Eh do sistema, controlar o estado de dispersão da polpa, facilitar e tornar mais seletiva a ação do coletor e tornar minerais hidrofílicos e imunes à ação do coletor, função conhecida como depressão (PERES et al., 2012).

Para que o processo de flotação ocorra é necessária a presença de três etapas fundamentais: colisão, em que ocorrem interações hidrodinâmicas; adesão, que ocorre pelas interações interfaciais; e o transporte, que só é possível quando houver estabilidade na adesão. Se alguma dessas etapas falharem, não ocorre a flotação (BALTAR, 2008).

3.2.2. Química de Superfície

3.2.2.1. Interface

Segundo Peres et al. (2012) uma fase pode ser definida como um porção homogênea, fisicamente distinta e mecanicamente separável. A transição entre duas fases acontece de forma gradual ao longo de uma região espacial, que apresenta uma de suas dimensões muito reduzida, designada como interface.

Considerando que no processo de flotação estão presentes os três estados da matéria-sólido, líquido e gasoso, é possível identificar cinco tipos de interface: sólido/sólido, sólido/líquido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás. Mesmo com o auxílio de técnicas sofisticadas de microscopia eletrônica, a pequena espessura das interfaces inviabiliza qualquer tentativa de observação “in situ” de fenômenos interfaciais. Todo conhecimento acumulado se baseia em modelos empíricos e em medidas experimentais de três grandezas: adsorção, tensão superficial e potencial zeta (PERES et al., 2012).

3.2.2.2. Tensão Superficial

Segundo Peres e Araujo (2009) a tensão superficial é definida quimicamente como a resistência à formação de uma ligação química. Para Massi et al (2008) a tensão superficial pode ser entendida como uma espécie de película que envolve os líquidos e é a responsável pela formação das bolhas. Este fenômeno ocorre pelo fato de que as moléculas situadas no interior de um líquido são, em média, sujeitas à força de atração igual em todas as direções, ao passo que as moléculas situadas na superfície de separação líquido-ar estão submetidas à forças de atração não balanceadas, o que resulta numa força preferencial em direção ao interior do líquido, o que pode ser visto na Figura 3.7. O maior número possível de moléculas se deslocará da superfície para o interior do líquido e a superfície tenderá a contrair-se (MASSI. et al, 2008).

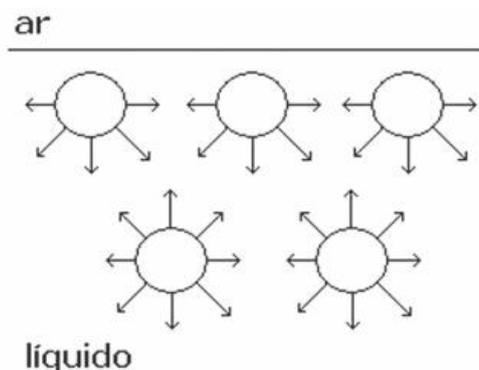


Figura 3.7 - Diagrama esquemático comparando as forças de atração entre moléculas na superfície e no interior de um líquido (MASSI. et al, 2008).

A tensão superficial de uma solução é afetada pela concentração do soluto. Os eletrólitos (KCl, NaCl, MgSO₄) geralmente aumentam a tensão superficial da água com o aumento de sua concentração. Para reduzir essa tensão superficial são usados os surfactantes ou tensoativos, como os álcoois, carboxilatos, aminas, sulfatos, sulfonatos, sais quaternários de amônio, etc. (MONTE E PERES, 2010).

Conforme Monte e Peres (2010) a hidrofobicidade de um sólido pode ser avaliada pelo ângulo de contato (Θ) entre as fases: sólida, líquida e gasosa. Este ângulo é medido na fase líquida, quando ele é estabelecido admite-se que se atingiu o equilíbrio entre as interfaces sólido-líquido, sólido-gás e gás-líquido. Se o ângulo Θ apresentar valores altos, as bolhas se espalham sobre a superfície e o sólido que não foi molhado pelo líquido é considerado hidrofóbico. A Figura 3.8 representa a linha de contato entre as fases sólido, líquido e vapor.

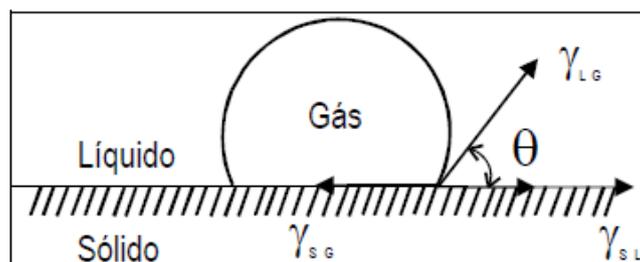


Figura 3.8 - Representação esquemática do ângulo de contato entre as fases líquida, sólida e gasosa em equilíbrio (MONTE E PERES, 2010).

A equação de Young determina a condição termodinâmica de equilíbrio entre as interfaces envolvidas, nesta equação o ângulo de contato Θ depende da tensão superficial ou energia livre superficial (γ) das três interfaces (FINCH E SMITH, 1979 apud MONTE E PERES, 2010):

$$\gamma_{SG}^0 - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos\theta$$

onde:

γ_{SG}^0 tensão superficial na interface sólido-gás;

γ_{SL} tensão superficial na interface sólido-líquido;

γ_{LG} tensão superficial na interface líquido-gás.

A validade da equação de Young se dá quando o sistema é ideal, onde os efeitos gravitacionais estão ausentes e as fases sólida, líquida e gasosa estão em equilíbrios. A superfície do sólido deve estar em equilíbrio com a pressão de vapor do líquido puro adsorvido nessa interface (MONTE E PERES, 2010).

Para uma adesão satisfatória entre bolha e partícula no processo de flotação, o ângulo de contato deve ser preferencialmente superior a 90° , caracterizando uma superfície hidrofóbica. Ângulos menores que 90° apresentam superfície hidrofílica, o que pode ser observado pela Figura 3.9 (MASSI et al, 2008).



Figura 3.9 - Superfícies hidrofílicas (a) apresentam ângulo de contato menores que 90° , enquanto superfícies hidrofóbicas (b) apresentam ângulos maiores que 90° (MASSI et al, 2008).

3.2.2.3. Adsorção

O fenômeno de acumulação de certa substância, moléculas, átomos ou íons na superfície de separação de duas fases é conhecido como adsorção e pode acontecer nas interfaces gás-sólido, líquido-sólido, líquido-gás, líquido-líquido. Os principais tipos de adsorção existentes são: a adsorção física e a adsorção química (MONTENEGRO, 2013).

No processo de adsorção na interface sólido-líquido, a força de retenção dos íons na interface é determinada pelo tipo de interação entre o íon e a superfície. Quando os sólidos estão em meio aquoso geralmente são carregados eletricamente e ocorre a

atração eletrostática de íons com carga de natureza contrária a do sólido, esta adsorção é não específica, rápida, reversível e os íons adsorvidos permanecem em equilíbrio dinâmico com a solução. Para o caso em que os íons são adsorvidos por mecanismos independentes da atração eletrostática, a adsorção é específica, sendo esta normalmente mais lenta, menos facilmente reversível e, portanto, uma situação de equilíbrio é mais difícil de ser alcançada. A adsorção específica pode ser química ou física, já a não específica é física (BALTAR, 2008 e OLIVEIRA, 2006).

A adsorção física esta relacionada com a presença de íons indiferentes na fase líquida, este tipo de adsorção ocorre através de uma diferença de energia e/ou forças de atração, chamadas forças de Van der Waals, que fazem com que as moléculas fiquem fisicamente presas ao adsorvente. Estas interações possuem longo alcance e são fracas. A adsorção física é exotérmica, reversível, pouco seletiva e acontece de forma rápida. A densidade desta adsorção depende, essencialmente, do excesso de carga existente na superfície do mineral (BALTAR, 2008 e ANDIA, 2009).

A adsorção química possui forças comparáveis a de ligações químicas, ela ocorre quando existe afinidade entre um íon específico presente na fase líquida e algum íon da superfície mineral, as espécies envolvidas formam um composto químico na superfície. A aproximação entre os íons não depende das cargas elétricas. O calor desta adsorção é elevado, o que a torna irreversível. A adsorção química ocorre de forma seletiva, já que existe a necessidade de uma compatibilidade química entre as espécies envolvidas (BALTAR, 2008 e ANDIA, 2009).

3.2.2.4. Dupla camada elétrica

As propriedades elétricas das interfaces são estudadas pelo modelo da dupla camada elétrica – DCE (PERES E ARAUJO, 2009). Segundo Carvalho (2003), neste modelo a dupla camada elétrica é resultado da interação entre a superfície eletricamente carregada dos minerais e a fase aquosa.

A carga de superfície do mineral atrai uma quantidade de íons de carga contrária que estão em suspensão (contraíons) e repele os que íons que possuem carga semelhante à da superfície (coíons), de forma a alcançar uma neutralidade elétrica. Desta forma, forma-se uma dupla camada elétrica constituída de duas partes, uma superfície carregada e um meio polar onde os contraíons se distribuem de maneira difusa, em

excesso para manter a neutralidade elétrica, e os coíons. A distribuição de íons é caracterizada por duas regiões: uma região interna, onde se encontram íons fortemente adsorvidos na superfície carregada (camada de Stern) e uma região difusa, conhecida como camada difusa ou de Gouy- Chaoman, em que os íons, adsorvidos não especificamente ou mantidos apenas por interações coulômbicas, estão distribuídos de acordo com a influência de forças elétricas e do movimento térmico (HENRIQUES, 2012).

A Figura 3.10 apresenta um modelo detalhado para a dupla camada elétrica, nela observa-se que a camada de Stern é dividida em dois planos: o Plano Interno de Helmholtz, que passa pelo centro de carga dos íons especificamente adsorvidos, e o Plano Externo de Helmholtz, que é o plano que passa pelos centros de carga dos íons solvatados. (BALTAR, 2008).

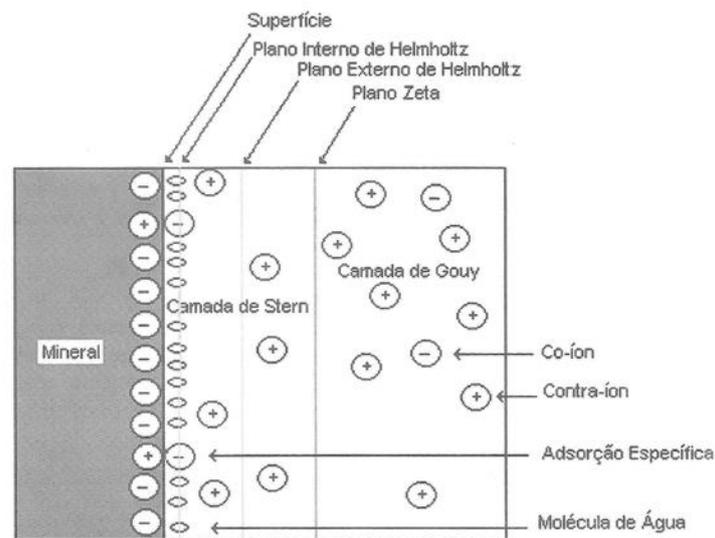


Figura 3.10 - Estrutura da dupla camada elétrica (BALTAR, 2008).

A Figura 3.11 mostra que o potencial eletrostático diminui à medida que se afasta da superfície da partícula em direção ao seio da solução, inicialmente de forma aproximadamente linear, na camada de Stern, e exponencialmente através da camada difusa. Na Figura 3.11 também é mostrado o potencial zeta, definido como o potencial medido no plano de cisalhamento, que está localizado dentro da camada difusa.

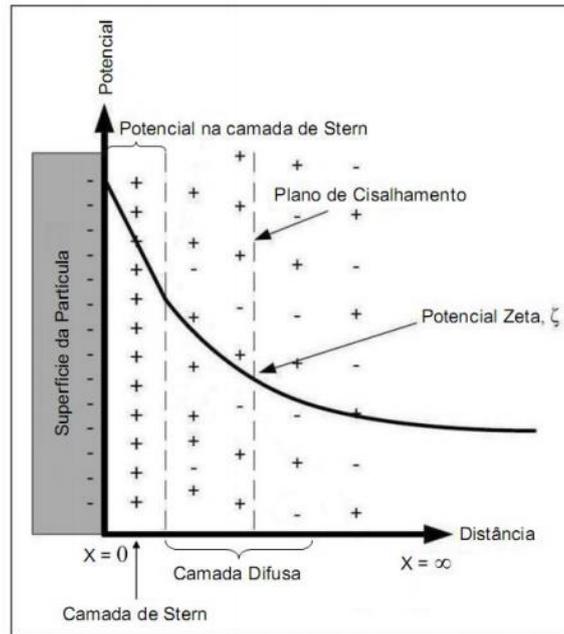


Figura 3.11 - Gráfico do potencial elétrico em função da distância da superfície da partícula até o seio da solução iônica (HUNTER, 1993 *apud* HENRIQUES, 2012).

3.2.2.5. Potencial Zeta

Segundo Baltar (2008), existem três tipos de íons que podem estar presentes em uma interface sólido-líquido:

- a- Íons determinantes de potencial (IDP): têm a possibilidade de se movimentar livremente da fase líquida para a fase sólida e vice-versa, dependendo das condições eletroquímicas da suspensão. Eles são responsáveis pela carga elétrica residual e pelo potencial da superfície. Quando a atividade destes íons na superfície corresponde a uma neutralização da carga elétrica da superfície considera-se que a superfície está em seu ponto de carga zero (pcz), em que não há excesso de carga elétrica na superfície.
- b- Íons indiferentes: aqueles atraídos apenas por atração eletrostática, como consequência de carga elétrica na superfície do sólido. Estes íons estão sempre solvatados e podem movimentar-se entre o plano externo de Helmholtz e a camada de Gouy. Eles não afetam o potencial da superfície, mas alteram o valor do potencial zeta.
- c- Íons específicos: são aqueles íons que têm afinidade por alguma espécie química componente do mineral, formando um composto químico na superfície do

sólido. Estão localizados no plano interno de Helmholtz e são desidratados.

Podem adsorver-se por atração eletrostática em superfícies com carga contrária.

O potencial eletrocinético, conhecido como potencial zeta, é gerado pelo movimento de uma partícula com excesso de carga na superfície, em relação ao líquido, sob ação de um campo elétrico. Neste movimento os íons adsorvidos na camada de Stern, junto com moléculas de água próximas a superfície, acompanham o sólido e geram esse potencial. O potencial zeta é definido no plano de cisalhamento, que separa o líquido da camada de Gouy do conjunto em movimento (BALTAR, 2008).

O ponto onde a carga líquida do plano de cisalhamento se anula é onde o potencial zeta é zero. Esse ponto é denominado ponto isoelétrico e nesta situação todo o excesso de carga, representado pelos contra-íons, estão comprimidos na camada de Stern. Quando não se tem íons adsorvidos especificamente, o ponto isoelétrico coincide com o ponto de carga zero (CARVALHO, 2003 e BALTAR, 2008).

O potencial zeta depende diretamente do pH da suspensão. Por isso, os íons OH^- e H^+ são denominados íons determinantes de potencial, e nesse caso o ponto isoelétrico é definido como o pH no qual o potencial zeta é nulo. Em pH maior que do ponto isoelétrico, as partículas minerais possuem carga superficial negativa e, para valores menores, carga superficial positiva (SILVA, 2014).

3.3. Flotação de Minério de Ferro

O processo de flotação tem sido amplamente usado para minerais metálicos e para minérios de ferro não magnéticos, quando se trabalha com uma faixa granulométrica fina ($< 150 \mu\text{m}$) a flotação é o método de concentração mais largamente adotado (ARAUJO et al., 2009 e LOPES, 2009).

O principal mineral de ganga presente no minério de ferro é o quartzo. Quando o mineral de ganga é o quartzo existem diferentes rotas de flotação (ARAUJO et al., 2009):

- i. Flotação catiônica reversa de quartzo;
- ii. Flotação aniônica direta de óxidos de ferro;
- iii. Flotação aniônica reversa de quartzo ativado.

A maior parte das pesquisas voltadas para flotação do minério de ferro ocorreu nos EUA durante as décadas de 1930 e 1940. A agência do USBM durante os anos 50

desenvolveu a rota de flotação catiônica reversa, que se tornou a técnica mais viável para flotação de minério de ferro nos EUA e em outros países ocidentais (ARAUJO *et al.*, 2009).

3.3.1. Flotação Catiônica reversa do quartzo

No processo de flotação catiônica reversa o quartzo é flotado com éter amina (R-O-(CH₂)₃-NH₂) parcialmente neutralizada com ácido acético, sendo que o grau de neutralização recomendado para a maioria das éter aminas atualmente é entre 25% e 30%. Maiores graus de neutralização aumentam a solubilidade, mas lesam o desempenho na flotação. Na flotação de minérios ferro a amina exerce também a função de espumante (ARAUJO *et al.*, 2009). Os amidos não modificados são usados como depressores dos minerais de ferro no processo de flotação, a elevada disponibilidade de amidos de milho os torna os mais empregados. Os amidos não modificados de elevado peso molecular precisam ser previamente gelatinizados, esse processo consiste em solubiliza-los com água quente ou adição NaOH (ARAUJO *et al.*, 2009). O NaOH é usado também como modulador de pH, para que ele seja ajustado a um valor próximo de 10,5 e possibilite a atuação da amina como coletor e espumante, e para manutenção do sistema disperso (SILVA, 2014).

3.3.2. Reagentes

3.3.2.1. Aminas

As aminas e seus derivados são responsáveis pela concentração de importantes minérios brasileiros, aproximadamente 5.500 toneladas de derivados de aminas são usado anualmente no Brasil em processos de concentração de hematita, willemita, calamina, pirocloro, calcita, magnesita, silvita e alguns tipos de apatita (NEDER E LEAL FILHO, 2005).

As aminas são moléculas que possuem uma parte hidrofílica e outra hidrofóbica, e têm a função de modificar a superfície do mineral hidrofílico para hidrofóbico. A parte hidrofóbica é composta por um hidrocarboneto e a hidrofílica por uma parte iônica ou polar. A Figura 3.12 apresenta um desenho esquemático da amina (MARQUES, 2013).

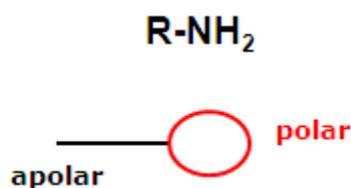


Figura 3.12 - Desenho esquemático da molécula de amina (MARQUES, 2013).

Conforme Baltar (2008), as aminas são derivadas do amônio (NH_3) pela substituição de um ou mais de seus átomos de hidrogênio por um certo número de cadeias hidrocarbônicas. De acordo com o número de radicais hidrocarbônicos unidos ao átomo de nitrogênio, as aminas podem ser primárias, secundárias, terciárias ou formar sais quaternários. Quando apenas um átomo de hidrogênio é substituído, a amina é primária, e assim, sucessivamente (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Grau de substituição e tipo de amina resultante.

Substituições	Composto
NH_3	Amônio
RNH_2	Amina primária
$\text{R}'\text{RNH}$	Amina secundária
$\text{R}''\text{R}'\text{RN}$	Amina terciária
$\text{R}'''\text{R}''\text{R}'\text{RN}.\text{Cl}$	Sal quaternário de amônio

A amina é o único coletor catiônico usado industrialmente. Sua ionização ocorre em solução aquosa por protonação (BALTAR, 2008):



As aminas primárias, secundárias e terciárias, por serem de bases fracas ionizam-se em função do pH, diferente das aminas quaternárias que ionizam completamente. O pH de máxima flotação para o quartzo, utilizando a amina, está na região entre 9,5 e 10,5,

região em que se tem a amina tanto na forma molecular quanto na forma iônica (BALTAR, 2008 e CHAVES, 2001 apud REIS, 2004).

A quantidade das espécies RNH_3^+ , $\text{RNH}_2(\text{aq})$ e $\text{RNH}_2(\text{s})$, quando a amina é colocada em água, depende do pH. Em meio ácido predomina RNH_3^+ , em pH em torno de 10 a quantidade dessa espécie cai bruscamente. Em meio alcalino predominam as espécies moleculares (BALTAR, 2008). A Figura 3.13 mostra o digrama de concentração de espécies para a dodecilamina na concentração 10^{-4} M que representa a presença de determinadas espécies em função do pH.

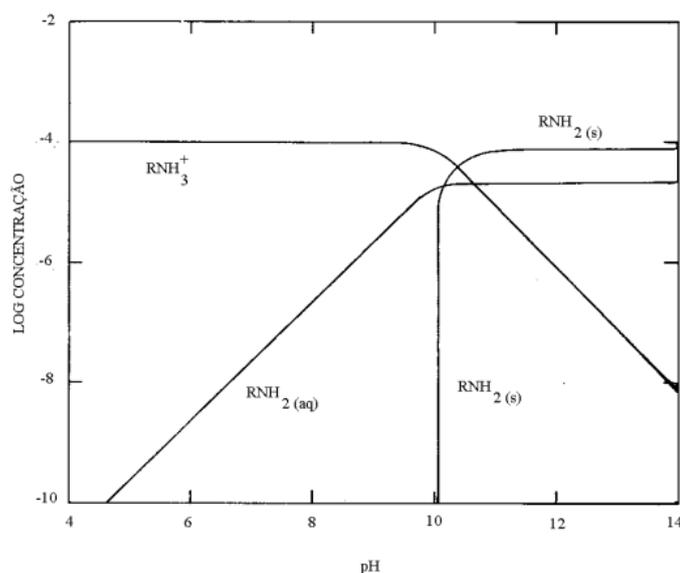


Figura 3.13 - Diagrama de espécies da dodecilamina na concentração de 1×10^{-4} M (Smith and Akhtar, 1976).

As aminas são reagentes que possuem solubilidade limitada, por isso são usados na forma de sais solúveis. O ácido acético (RCOOH) e o ácido clorídrico (HCl) são os mais usados para neutralizar a base orgânica (BALTAR, 2008).

Na flotação do minério de ferro, o quartzo tem sua característica superficial modificada pela amina, tornando-se apolar, assim passa a ter afinidade pelo ar e é coletado por ele. A amina é adsorvida por atração eletrostática inicial entre a cabeça polar ionizada do coletor e a superfície mineral com carga oposta, seguida da formação de hemimicelas por ligações de van der Waals entre os radicais do coletor. Na Figura 3.14 é possível observar o processo de adsorção da amina: à esquerda tem-se a adsorção de íons individuais, que não hidrofobiza a partícula; no centro tem-se a formação de

hemimicelas, que imobiliza o coletor adsorvido; e á direita tem-se a adsorção em multicamadas, que traz de volta a partícula à sua condição hidrofílica (MARQUES, 2013).

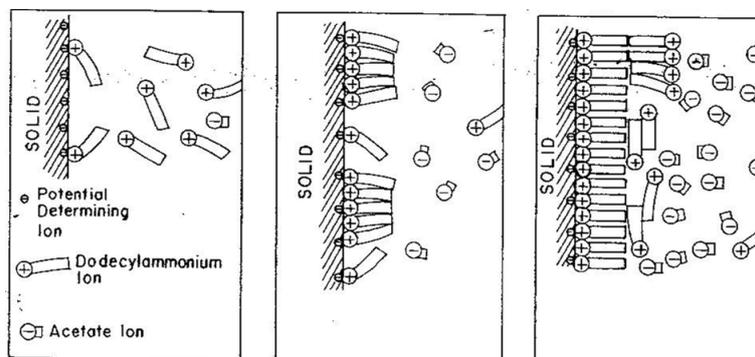


Figura 3.14 - Desenho esquemático da adsorção de íons individuais (esquerda), formação hemimicelas (centro) e multicamada (direita) (Smith & Akhtar, 1976 apud Marques, 2013).

O uso de coletor em excesso pode induzir a formação de micelas, de forma indesejável (Figura 3.15), aprisionando os coletores e/ou causando a reversão de carga do quartzo (MARQUES, 2013).

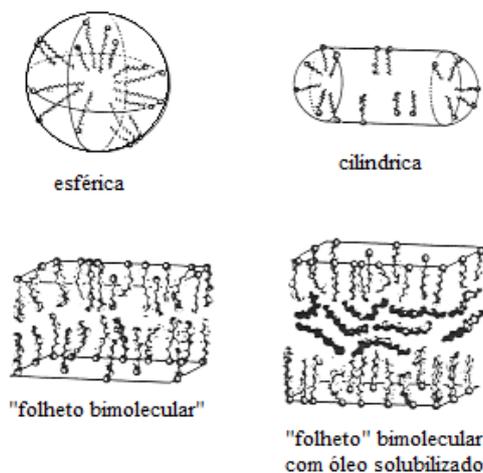


Figura 3.15 - Desenho esquemático da formação de micelas (Leja, 1982).

3.3.2.2. Amido

O amido está disponível em abundância na natureza, podendo ser encontrado em todos os componentes dos vegetais de folhas verdes, sejam nas suas raízes, caules, sementes ou frutas (CEREDA, 2001 apud MOREIRA, 2013). A principal fonte comercial de amido é o milho, mas também é comum o uso dos amidos de batata, trigo e mandioca.

O amido é largamente utilizado no processamento mineral como depressor na flotação e floculante. O seu uso é atrativo devido ao baixo custo e biodegradabilidade (SABLEVICIENE et al, 2005 e WEISSENBORN et al, 1995). Segundo Turrer (2007) no Brasil são consumidos aproximadamente 55 mil toneladas de amido no processo de concentração de minérios de ferro e fosfático e o seu custo é em torno de R\$400/tonelada do produto.

Conforme Cereda (2001) apud Moreira (2013) a estrutura macro molecular do amido lhe atribui propriedades particulares como solubilidade, viscosidade e poder de gelatinização.

O amido é um polímero natural, formado pela condensação de moléculas de glicose originadas através do processo de fotossíntese. A fórmula química simplificada do amido é $(C_6H_{10}O_5)_n$, em que n representa o numero de moléculas D(+) glicose que compõem a macromolécula de amido (CEREDA, 2001 apud MOREIRA, 2013).

O amido é um polissacarídeo formado por cadeias de amilose e amilopectina. A amilose é composta por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α -(1,4), originando uma cadeia linear, que pode formar estruturas helicoidais. E a amilopectina é formada por unidades de glicose unidas em α -(1,4) e α -(1,6), formando uma estrutura ramificada (MOREIRA, 2013). As estruturas da amilose e amilopectina são apresentadas na Figura 3.16.

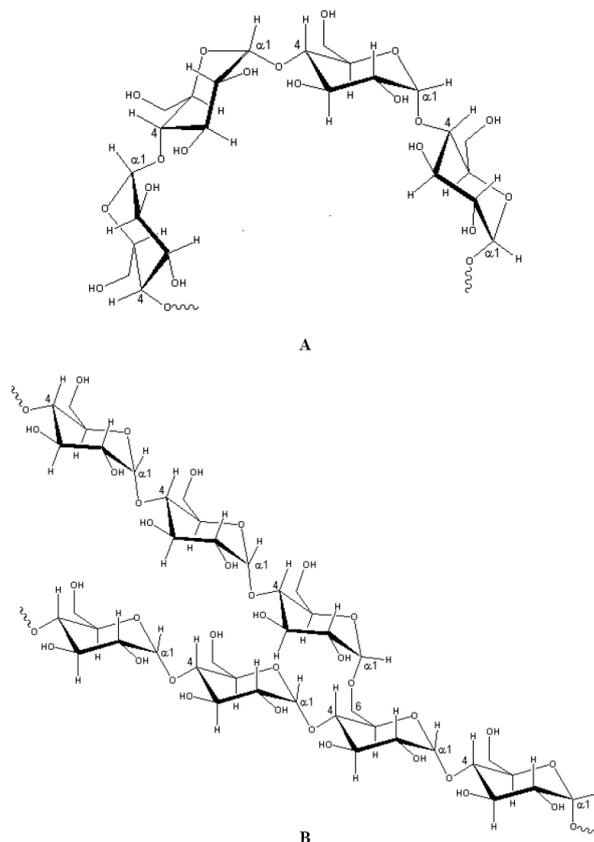


Figura 3.16 - A) Estrutura da amilose [polímero linear composto por D-glicoses unidas em α -(1-4)]. B) Estrutura da amilopectina [polímero ramificado composto por D-glicoses unidas em α -(1-4) e α -(1-6)]. Fonte: Adaptado de LAJOLO & MENEZES (2006) apud DENARDIN e SILVA (2009).

De acordo com Almeida (2013), os minerais de ferro são deprimidos por amidos não modificados, mas todos os tipos deste amido de elevado peso molecular precisam ser solubilizados. Para solubilizar o amido é necessário que ele passe por um processo de rompimento das ligações intragranulares pelo aumento da temperatura ou pela adição de reagentes químicos, esse processo é conhecido como gelatinização.

A gelatinização do amido ocorre quando a temperatura aumenta na faixa de 60 a 70°C. Ao aquecer a suspensão do amido, a intensidade das pontes de hidrogênio é reduzida, ocorre adsorção de água pelos grãos e, assim, o aumento dos mesmos. Como resultado deste aumento a solubilidade do amido também cresce, formando uma goma clara e viscosa. A temperatura de gelatinização é função do pH, bases orgânicas são conhecidas por quebrar ligações de hidrogênio. Na gelatinização do amido o mais comum é usar o hidróxido de sódio. As micelas decorrentes do processo de gelatinização adsorvem uma parte do álcali e a concentração de NaOH na solução é reduzida. Assim, para ocorrer a gelatinização do amido é necessário adicionar NaOH

em quantidade suficiente para que parte seja adsorvida pelo amido e parte fique em solução em uma concentração adequada (BOBBIO & BOBBIO, 1995).

Segundo Turrer (2007), os amidos compostos em sua maioria por amilopectina proporcionam uma maior seletividade na depressão da hematita no processo de flotação.

3.3.2.3. Codepressores

Segundo Raso (2014), os codepressores desenvolvidos pela Georgia-Pacific são polímeros catiônicos de baixo peso molecular, possuem grupos funcionais de oxigênio carbonílicos, oxigênios eterificados e nitrogênio inseridos na cadeia, sendo classificadas como poliamina-poliâmidas. A fórmula geral dos codepressores é apresentada na Figura 3.17.

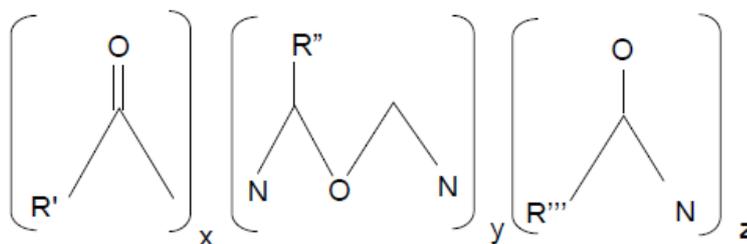


Figura 3.17 - Fórmula geral dos codepressores (SOUZA et al., 2010 apud RASO, 2014).

Conforme descrito por Raso (2014) o codepressor deprime o mineral de ferro, já que possui a singular ação quelante sobre os íons de ferro. Ele age através de sua adsorção na superfície da hematita por ligações tipo ponte de hidrogênio e dipolo-dipolo. O mecanismo proposto pela Georgia-Pacific considera a ligação química entre os dois codepressores e a molécula de amido, resultando em um efeito sinérgico entre os dois reagentes, devido ao aumento de tamanho das cadeias poliméricas.

Os codepressores também agem aglomerando as partículas finas, retirando a lama do sistema. Isto reduz a área

superficial total das partículas e diminui consumo de reagentes, o que permite que estes reagentes estejam mais disponíveis para ligarem-se aos corpos de interesse, aumentando a seletividade. O codepressor irá atuar como um aditivo do amido e não o substituindo (RASO, 2014).

Os codepressores são seguros para uso, não são corrosivos ou tóxicos e não requerem preparo prévio. É um produto biodegradável e fabricado no Brasil, representando uma opção conveniente para utilização pelas mineradoras (RASO, 2014).

4. METODOLOGIA

4.1. Origem e Preparo das Amostras

Nos testes de microflotação e na determinação do potencial zeta foram utilizadas amostras de elevada pureza, hematita fornecida pela empresa Minerita e proveniente da mina Lagoa das Flores em Itatiaiuçu- MG, localizada na região do quadrilátero ferrífero, e o mineral quartzo proveniente de um pegmatito da região de Santa Maria do Suaçuí, Minas Gerais.

As etapas do preparo das amostras de hematita e quartzo utilizadas nos testes de microflotação e na análise do potencial zeta são apresentadas na Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

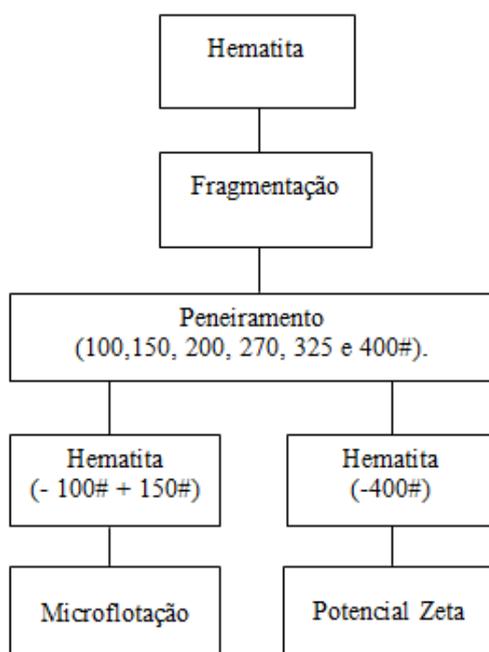


Figura 4.1 - Fluxograma ilustrativo preparação da amostra de hematita.

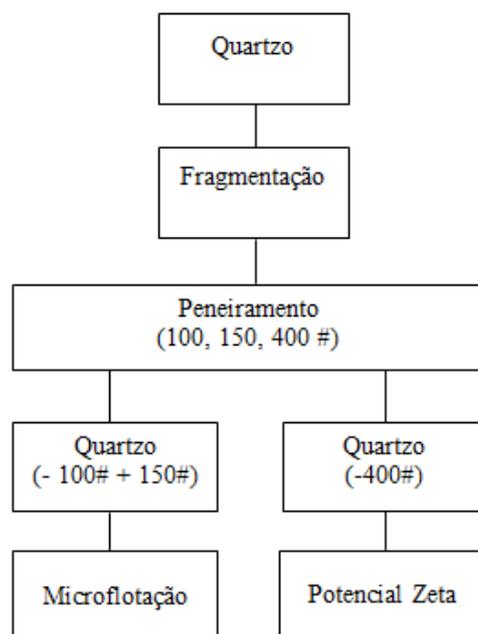


Figura 4.2 - Fluxograma ilustrativo preparação da amostra de quartzo

4.2. Preparação da solução de reagentes

Os reagentes utilizados na flotação como coletores, depressores e codepressores estão apresentados na Tabela 4.1, estes reagentes foram preparados conforme descrito a seguir.

Tabela 4.1 - Reagentes utilizados.

Coletor	Depressor	Codepressor	Modulador de pH
Amina (Éter diamina)	Amido de milho (Maizena)	GPR 855 (Georgia Pacific)	NaOH/HCl

4.2.1. Preparação do coletor amina 5% p/v

- 1- Pesou-se 2,5 g de amina;
- 2- Transferiu-se para um balão volumétrico de 500 mL;

- 3- Adicionou-se uma pequena quantidade de água aquecida e agitou-se a solução até ficar homogênea;
- 4- Transferiu-se para o balão volumétrico de 500 mL e adicionou-se água para completar o volume.

4.2.2. Preparação do depressor amido gelatinizado 2% p/v

- 1- Pesou-se 10 g de amido em um béquer de 500 mL;
- 2- Adicionou-se 20 mL de água destilada (2 mL para cada 1 g de amido), e agitou-se com agitador para homogeneização;
- 3- Adicionou-se 27 mL de NaOH 10% p/v (2,7 mL para cada 1 g de amido) e agitou-se até completa gelatinização do amido, formando um líquido viscoso e transparente;
- 4- Transferiu-se a mistura para um balão volumétrico de 500 mL e aferiu-se.

4.2.3. Preparação do codepressor GPR – 855 2% p/v

- 1- Pesou-se 10 g de codepressor GPR-855 em um béquer de 500mL;
- 2- Adicionou-se uma pequena quantidade de água destilada, e agitou-se com agitador para homogeneização;
- 3- Transferiu-se a solução para um balão volumétrico de 500 mL e completou-se seu volume com água destilada;

4.3. Microflotação

Os ensaios de microflotação foram realizados utilizando o tudo de Hallimond modificado com extensor de altura, que evita o arraste hidrodinâmico das partículas, e usando um agitador magnético com a mínima agitação possível de forma que não ocorresse o arraste hidrodinâmico. O tudo de Hallimond usado nos testes é apresentado na Figura 4.3.

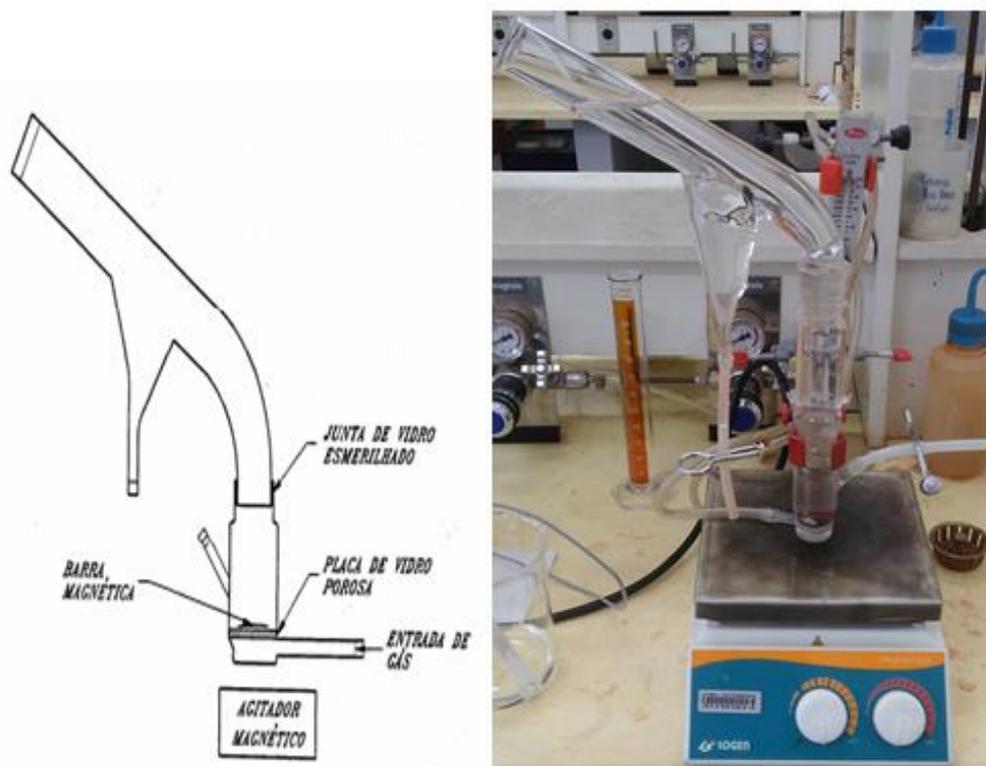


Figura 4.3 - Tubo de Hallimond modificado.

As principais variáveis do processo foram tipo de depressor, concentração de reagentes e pH de flotação.

Os ensaios de microflotação foram realizados para determinar o comportamento e seletividade do GPR 855 um novo de tipo de reagente, empregado como codepressor, que atua juntamente com o amido de milho. Os testes foram feitos para os minerais hematita e quartzo, na presença de coletor, depressor, coletor/depressor, depressor/codepressor e coletor/depressor/codepressor. A dosagem dos reagentes foi baseada na dosagem ótima encontrada por Raso (2014) para se trabalhar com o codepressor na flotação catiônica reversa de minério de ferro, sendo: 800 g/t de depressor amido de milho, 70 g/t de coletor amina e 70 g/t de codepressor GPR -855.

A metodologia para a realização dos ensaios de microflotação na presença de coletor foi efetuada da seguinte forma:

- i. Pesou-se 1 g da amostra (hematita e quartzo) com tamanho entre $106\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$;
- ii. Pesaram-se os papéis filtro, identificaram-se os mesmos e anotou-se a massa de cada filtro;

- iii. Preparou-se solução de coletor, ajustando-se o pH no valor desejado. Os valores obtidos foram anotados após o ajuste;
- iv. Transferiu-se para o tubo de Hallimond 1g da amostra juntamente com a barra magnética colocada na parte inferior do tubo;
- v. Colocou-se o extensor e a parte superior do tubo;
- vi. Adicionou-se 320 mL da solução de coletor nas concentrações: 2,5; 5; 7,5; 10 mg/L com pH previamente ajustado para 9, 10 e 11;
- vii. Condicionou-se por 1 minuto;
- viii. Iniciou-se a flotação introduzindo-se uma vazão de ar de 40 cc/min e flotou-se por 1 minuto;
- ix. Fechou-se o nitrogênio, cessou-se a agitação e recolheram as frações de flotado e afundado, separadamente;
- x. Filtrou-se e secou-se cada fração, estas foram pesadas para o cálculo da flotabilidade de acordo com a Equação 1.

A metodologia para a realização dos ensaios de microflotação na presença de depressor foi efetuada da seguinte forma:

- i. Pesou-se 1 g da amostra (hematita e quartzo) com tamanho entre 106 μ m e 150 μ m;
- ii. Pesaram-se os papéis filtro, identificaram-se os mesmos e anotou-se a massa de cada filtro;
- iii. Preparou-se solução de depressor e água destilada, ajustando-se o pH no valor desejado. Os valores obtidos foram anotados após o ajuste;
- iv. Transferiu-se para o tubo de Hallimond 1g da amostra juntamente com a barra magnética colocada na parte inferior do tubo;
- v. Adicionou-se 20 mL da solução de depressor na concentração 40 mg/L, e condicionou-se por 5 minutos;
- vi. Mediu-se o pH solução;
- vii. Colocou-se o extensor e a parte superior do tubo;
- viii. Completou-se o volume do tubo com água destilada;
- ix. Iniciou-se a flotação introduzindo-se uma vazão de ar de 40 cc/min e flotou-se por 1 minuto;

- x. Fechou-se o nitrogênio, cessou-se a agitação e recolheram as frações de flotado e afundado, separadamente;
- xi. Filtrou-se e secou-se cada fração, estas foram pesadas para o cálculo da flotabilidade de acordo com a Equação 1.

A metodologia para a realização dos ensaios de microflotação na presença de coletor e depressor foi efetuada da seguinte forma:

- i. Pesou-se 1 g da amostra (hematita e quartzo) com tamanho entre 106 μ m e 150 μ m;
- ii. Pesaram-se os papéis filtro, identificaram-se os mesmos e anotou-se a massa de cada filtro;
- iii. Preparou-se solução de coletor, depressor e água destilada, ajustando-se o pH no valor desejado. Os valores obtidos foram anotados após o ajuste;
- iv. Transferiu-se para o tubo de Hallimond 1g da amostra juntamente com a barra magnética colocada na parte inferior do tubo;
- v. Adicionou-se 20 mL da solução de depressor na concentração 40mg/L, e condicionou-se por 5 minutos;
- vi. Adicionou-se 10mL da solução concentrada de coletor, e condicionou-se por mais 1 minuto;
- vii. Mediu-se o pH solução;
- viii. Colocou-se o extensor e a parte superior do tubo;
- ix. Completou-se o volume do tubo com água destilada;
- x. Iniciou-se a flotação introduzindo-se uma vazão de ar de 40 cc/min e flotou-se por 1 minuto;
- xi. Fechou-se o nitrogênio, cessou-se a agitação e recolheram as frações de flotado e afundado, separadamente;
- xii. Filtrou-se e secou-se cada fração, estas foram pesadas para o cálculo da flotabilidade de acordo com a Equação 1.

A metodologia para a realização dos ensaios de microflotação na presença de coletor e depressor foi efetuada da seguinte forma:

- i. Pesou-se 1 g da amostra (hematita e quartzo) com tamanho entre 106 μ m e 150 μ m;

- ii. Pesaram-se os papéis filtro, identificaram-se os mesmos e anotou-se a massa de cada filtro;
- iii. Preparou-se solução de coletor, depressor, codepressor e água destilada, ajustando-se o pH no valor desejado. Os valores obtidos foram anotados após o ajuste;
- iv. Transferiu-se para o tubo de Hallimond 1g da amostra juntamente com a barra magnética colocada na parte inferior do tubo;
- v. Adicionou-se 2mL da solução de codepressor na concentração 40mg/L na parte inferior do tubo, e condicionou-se por 1 minuto;
- vi. Adicionou-se 20mL da solução de depressor na concentração 40mg/L, e condicionou-se por mais 5 minutos;
- vii. Adicionou-se 10mL da solução concentrada de coletor, e condicionou-se por mais 1 minuto;
- viii. Mediu-se o pH solução;
- ix. Colocou-se o extensor e a parte superior do tubo;
- x. Completou-se o volume do tubo com água destilada;
- xi. Iniciou-se a flotação introduzindo-se uma vazão de ar de 40cc/min e flotou-se por 1 minuto;
- xii. Fechou-se o nitrogênio, cessou-se a agitação e recolheram as frações de flotado e afundado, separadamente;
- xiii. Filtrou-se e secou-se cada fração, estas foram pesadas para o cálculo da flotabilidade de acordo com a Equação 1.

$$Flotabilidade (\%) = \left[\frac{\text{massa do flotado}}{\text{massa do flotado} + \text{massa do afundado}} \right] \times 100 - \text{arraste}$$

Equação 1

4.4. Potencial Zeta

As medidas de potencial zeta foram realizadas para os minerais hematita e quartzo. Foi utilizado o equipamento Zeta Meter ZD3-D-G 3.0+, da Zeta Meter System do Laboratório de Fenômenos Interficiais do DEMIN/UFMG para a determinação das curvas de potencial zeta.

As curvas de potencial zeta em função do pH foram levantadas da seguinte forma:

- i. Preparou-se a solução de reagente KNO_3 em um béquer de 2L;
- ii. Pesou-se 0,4 g do mineral para cada valor de pH;
- iii. Adicionou-se o mineral (0,4 g) a solução de reagente;
- iv. Agitou-se a dispersão por um curto período de tempo;
- v. Decantou-se a solução de um dia para o outro;
- vi. Coletou-se a dispersão com o auxílio de uma pequena mangueira;
- vii. Ajustou-se o valor do pH da solução adicionando solução diluídas de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH), variando o pH de: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11;
- viii. Injetou-se a dispersão na cubeta, previamente limpa e ambientada com a própria dispersão;
- ix. Colocou-se a cubeta no equipamento para medição do potencial zeta;
- x. Plotou-se o gráfico com os valores medidos no zetâmetro em função do pH.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Potencial Zeta

A Figura 5.1 apresenta as curvas de potencial zeta para as amostras de hematita e quartzo em função do pH. O potencial zeta das amostras foi medido pelo método da eletroforese em presença do eletrólito indiferente KNO_3 , medindo a mobilidade eletroforética das partículas carregadas em suspensão aquosa.

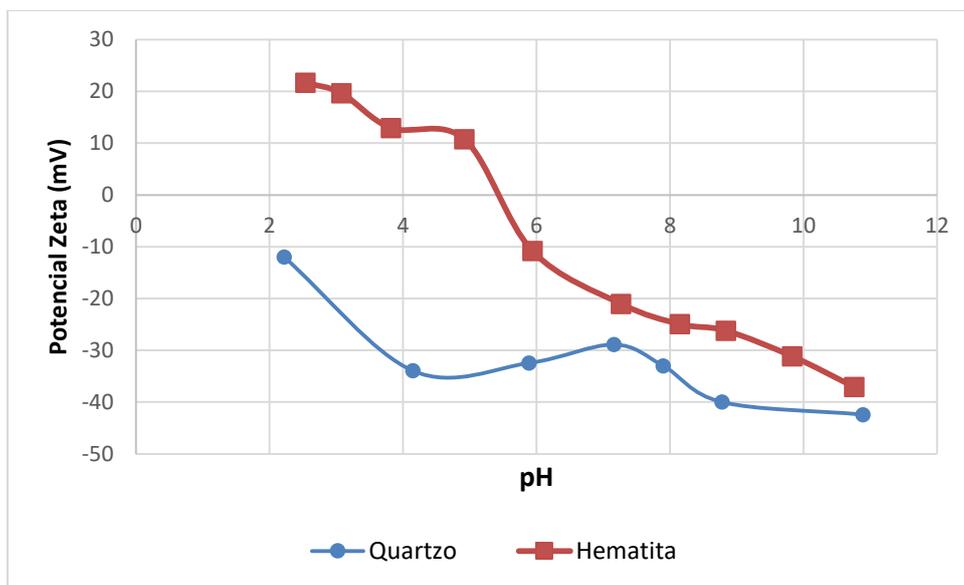


Figura 5.1 - Potencial Zeta da hematita e quartzo em função do pH.

Pela curva de potencial zeta apresentada na Figura 5.1 observa-se que para o quartzo a carga de superfície é negativa em toda faixa de pH analisada, já que o potencial zeta deste mineral foi negativo para todos os valores de pH. O ponto isoelétrico da hematita foi verificado em pH 5, aproximadamente. Desta forma, em pH menores que pH 5, em que a faixa é ácida, a carga de superfície da hematita é positiva e para faixa básica (pH maiores que pH 5) a carga de superfície é negativa.

5.2. Microflotação

Flotabilidade da hematita e quartzo com amina

As Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam os resultados dos testes de microflotação utilizando a amina, em diferentes concentrações (2,5; 5; 7,5 e 10 mg/L) e variando os valores de pH, para os minerais quartzo e hematita.

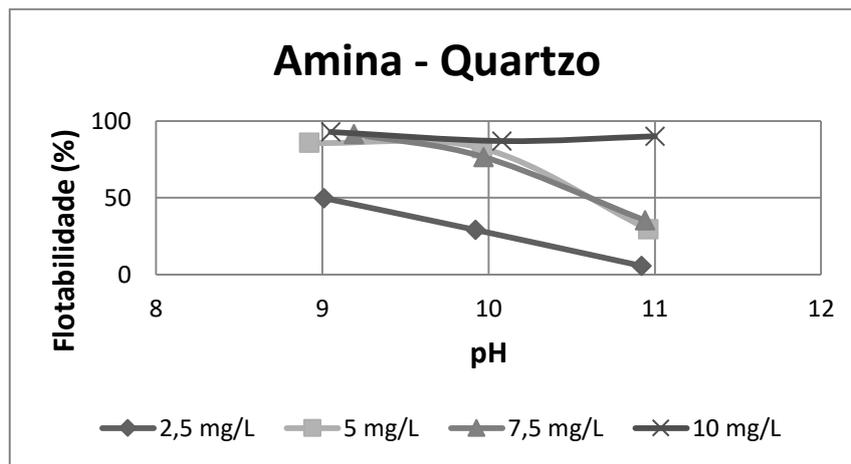


Figura 5.2 - Flotabilidade do mineral quartzo condicionado com amina em diferentes concentrações e valores de pH.

Pela análise do gráfico da Figura 5.2 observam-se maiores flotabilidade do mineral quartzo quando este está condicionado com maiores concentração de amina, sendo que os melhores resultados de flotabilidade obtidos com 10 mg/L de amina em toda faixa de pH. A máxima flotabilidade obtida foi 92,95 % com 10 mg/L de amina e em pH 9. Para as concentração menores que 10 mg/L de amina observa-se uma queda brusca de flotabilidade para pH com valores maiores que pH 10.

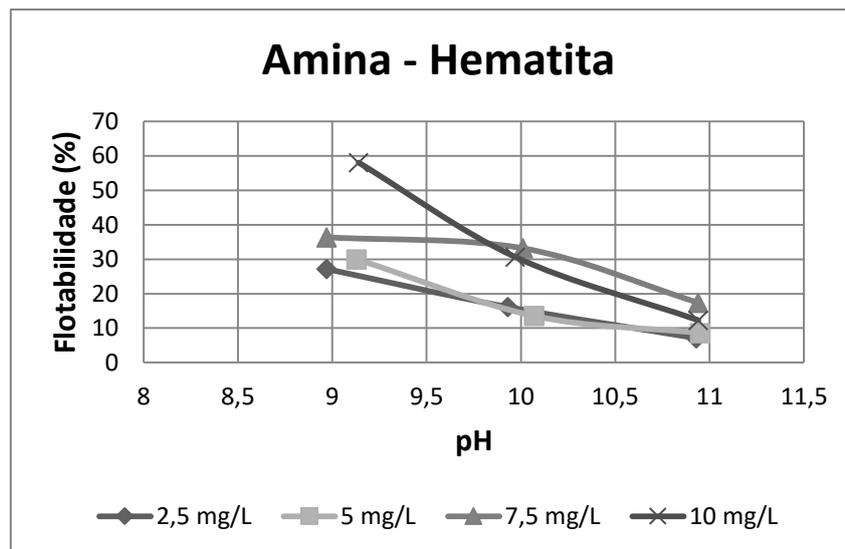


Figura 5.3 - Flotabilidade do mineral hematita condicionado com amina em diferentes concentrações e valores de pH.

Para o mineral hematita apresentado no gráfico da Figura 5.3 a flotabilidade foi mais baixa quando se utilizou menores concentrações de amina e valores de pH mais altos. Sendo a menor flotabilidade 7,1 % com dosagem de 2,5 mg/L de amina e pH 11.

Na ausência de depressor a melhor situação para o processo de flotação catiônica reversa do minério de ferro, em que amina coleta o mínimo possível de hematita, é com menores concentrações de amina. Porém, o condicionamento dos minerais estudados com amina em pH 9 e concentração 10 mg/L apresenta flotabilidade 92,95% para o quartzo e 58,05% para a hematita. Sendo assim, nessas condições observa-se uma maior afinidade da amina pelo quartzo em relação à hematita, podendo definir essa concentração suficiente para atingir a máxima flotabilidade de ambos os minerais, e ideal para realizar os demais ensaios de microflotação.

Depressão da hematita e quartzo com amido

Os resultados dos testes de microflotação da hematita e do quartzo utilizando 40 mg/L do depressor amido em pH 8; 9; 10 e 11 são apresentados no gráfico da Figura 5.4.

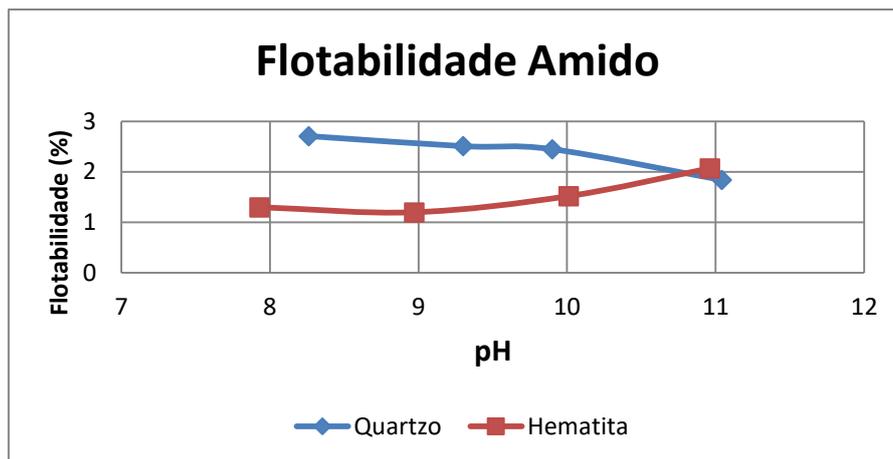


Figura 5.4 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L em diferentes valores de pH.

A mínima flotabilidade da hematita (1,2%) ocorreu em pH 9 e o quartzo apresentou sua menor flotabilidade (1,84%) em pH 11.

Observa-se que com o aumento do valor de pH a flotabilidade da hematita tende a aumentar enquanto a do quartzo diminui. Nota-se também uma maior afinidade do depressor amido milho pela hematita em relação ao mineral quartzo. Contudo, sem a presença do coletor a seletividade na separação dos dois minerais diminui com o aumento do pH.

Flotabilidade da hematita e quartzo com amido e amina

A Figura 5.5 apresenta as flotabilidades dos minerais hematita e quartzo condicionados com coletor amina e depressor amido com concentrações 10 mg/L e 40 mg/L, respectivamente. Variando-se o valor de pH em 8, 9, 10 e 11.

Pela análise do gráfico da Figura 5.5 verifica-se que nessas condições de condicionamento dos minerais hematita e quartzo com amina e amido uma maior flotabilidade do quartzo em relação à hematita em toda faixa de pH. Observa-se uma maior seletividade na separação entre os minerais quartzo e hematita no pH 9, em que obteve-se a maior recuperação do quartzo com 17% e a menor recuperação da hematita com 5,2%. A seletividade na separação destes minerais tende a diminuir em valores de pH maiores que pH 9.

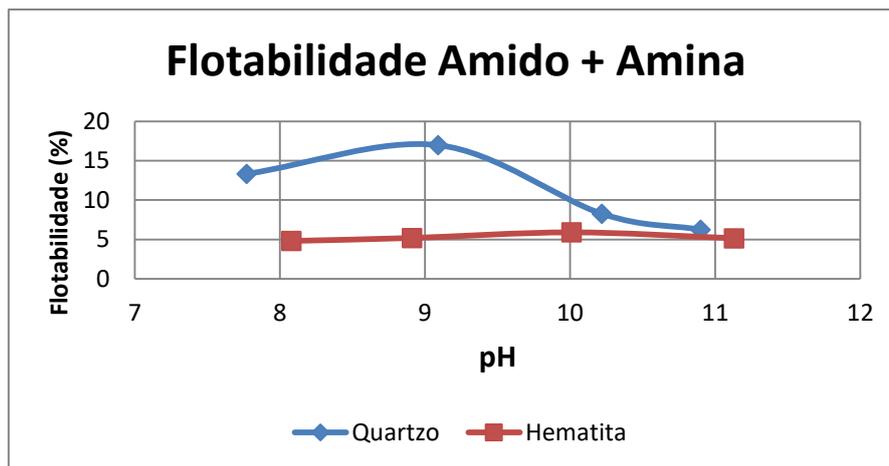


Figura 5.5 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L e amina a 10 mg/L em diferentes valores de pH.

Depressão da hematita e quartzo com amido e GPR- 855

As flotabilidade dos minerais hematita e quartzo quando condicionados com depressor amido de milho e codepressor GPR-855, ambos com concentração de 40 mg/L, são apresentados na Figura 5.6.

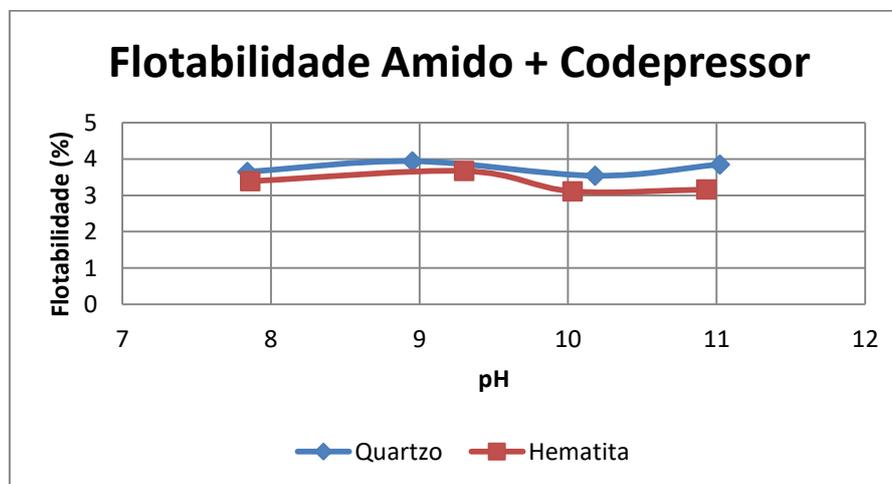


Figura 5.6 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L e codepressor (GPR -855) a 40 mg/L em diferentes valores de pH.

Observa-se pela Figura 5.6 em toda faixa de pH valores de flotabilidade do quartzo e da hematita muito próximos. O maior valor de flotabilidade do quartzo foi de 3,94% e da hematita de 3,67%, enquanto os menores valores de flotabilidade para o quartzo e hematita foram 3,65% e 3,11%, respectivamente. Este fato demonstra que a presença do

codepressor na ausência de coletor não melhorou o efeito de deprimir a hematita em relação ao quartzo, sendo que ambos foram deprimidos na mesma intensidade e não conduzindo a um aumento de seletividade na separação destes minerais.

Flotabilidade da hematita e quartzo com amido, GPR-855 e amina

Os resultados dos testes de microflotação condicionados com coletor amina (10 mg/L), depressor amido de milho (40 mg/L) e codepressor GPR-855 (40 mg/L) em diferentes valores de pH (7,5 ; 9; 10; 11) são apresentados na Figura 5.7.

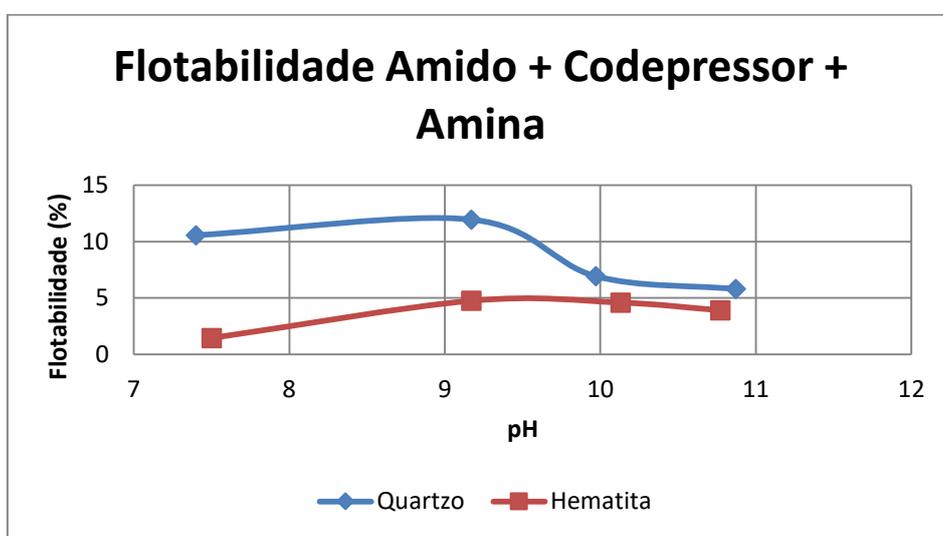


Figura 5.7 - Flotabilidade dos minerais hematita e quartzo condicionado com amido a 40 mg/L, codepressor (GPR- 855) a 40 mg/L e amina a 10 mg/L em diferentes valores de pH.

Observa-se no gráfico da Figura 5.7 que a maior flotabilidade do quartzo foi de 11,95% e da hematita de 4,75%, esses maiores valores de flotabilidade ocorreram em pH 9, aproximadamente. Nota-se também que maior diferença entre as flotabilidades de quartzo e hematita ocorreu entre o pH 7,5 e 8, no qual a flotabilidade do quartzo foi de 10,56% e da hematita de 1,45%, portanto neste valor de pH a separação entre os dois minerais apresentou maior seletividade. Em valores de pH maiores que pH 8 a seletividade tende a diminuir, tendo uma queda brusca em pH 10, sendo menos seletivo no pH 11.

Comparando-se o comportamento dos minerais condicionados com depressor, codepressor e coletor com o comportamento destes apenas com coletor e depressor, Figura 5.5 e Figura 5.7, verifica-se que o codepressor auxilia no aumento da

seletividade em pH entre 7,5 e 8, pois consegue deprimir a hematita com uma intensidade um pouco maior. Isso também ocorre em pH 11, apesar de ser o pH que apresentou menor seletividade ao utilizar o codepressor. Nos demais valores de pH, as diferenças de flotabilidade entre a hematita e o quartzo foram muito próximas ou menores do que as observadas ao utilizar apenas amina e amido de milho. Sendo assim, para valores de pH entre pH 8 e pH 11 o uso do codepressor não proporcionou efeito significativo sobre o aumento da seletividade.

6. CONCLUSÃO

- O ponto isoelétrico da hematita próximo do pH 5.
- O quartzo apresentou carga de superfície negativa em toda faixa de pH analisada (pH 8; 9; 10 e 11).
- As condições ideais encontradas para se trabalhar com a amina foram concentração 10 mg/L e pH 9. Condições essas em que houve uma maior afinidade da amina pelo quartzo em relação à hematita e possibilitou a máxima flotabilidade dos minerais.
- Na presença do depressor amido de milho (concentração 40 mg/L e dosagem 800 g/t), sem o coletor, a seletividade na separação entre a hematita e o quartzo diminui com o aumento do pH.
- Na presença do coletor amina (10 mg/L) e do depressor amido de milho (concentração 40 mg/L e dosagem 800 g/t) a maior seletividade na separação entre minerais quartzo e hematita ocorre em no pH 9, com tendência a diminuir em valores de pH maiores que pH 9.
- A presença do codepressor (concentração 40 mg/L e dosagem 70 g/t) juntamente com depressor (concentração 40 mg/L e dosagem 800 g/t), na ausência do coletor amina, não proporciona um aumento de seletividade na separação entre hematita e quartzo, deprimindo ambos na mesma intensidade.
- Na presença de coletor (concentração 10mg/L e dosagem 70 g/t), depressor (concentração 40 mg/L e dosagem 800 g/t) e codepressor (concentração 40 mg/L e dosagem 70 g/t) a maior seletividade ocorreu entre pH 7,5 e 8. Para valores pH maiores que pH 8 a seletividade tende a diminuir, apresentando a mínima seletividade em pH 11.
- Utilizando as condições ótimas: coletor na concentração 10mg/L e dosagem 70 g/t, depressor na concentração 40 mg/L e dosagem 800 g/t, e codepressor em concentração 40 mg/L e dosagem 70 g/t, o codepressor auxilia no aumento da seletividade da separação entre os minerais hematita e quartzo em pH próximo ao pH 8 e em pH 11, apesar de ser o pH 11 o que apresentou menor seletividade ao utilizar o codepressor, uma vez que este consegue deprimir a hematita com uma intensidade um pouco maior do que nas condições tradicionais do processo de flotação catiônica reversa de minério

de ferro. Já para os demais valores de pH, o uso do codepressor não proporcionou efeito significativo sobre o aumento da seletividade, apresentando diferenças de flotabilidade muito próximas ou menores do que as observadas ao utilizar apenas amina e amido de milho. Sendo assim, para valores de pH entre pH 8 e pH 11 o uso do codepressor não proporcionou efeito significativo sobre o aumento da seletividade.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização desta pesquisa e de seus resultados, são apresentadas as seguintes recomendações para trabalhos futuros para que estes possam desenvolver as limitações do presente trabalho:

- Realizar os testes de microflotação com hematita e quartzo empregando o codepressor GPR-855 em concentrações variadas para verificar a melhoria no processo de flotação catiônica reversa de minério de ferro ao utilizar este tipo de codepressor em concentrações diferentes da usada neste trabalho.
- Sugere-se a realização de ensaios de microflotação utilizando outros tipos de codepressores associados ao amido de milho para avaliar flotabilidade e seletividade de separação entre a hematita e o quartzo.
- Sugere-se a elaboração de um estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de codepressor com o intuito de analisar a possibilidade de aplicação destes em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. M. R. **A Flotação de Minérios de Ferro de Baixo Teor no Brasil Uma Revisão**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. 18p. (Monografia, Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais).

ANDIA, J. P. M. **Remoção de Boro de Águas e Efluentes de Petróleo por Adsorção**. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia de Materiais – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. 138p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos).

ARAUJO, A. C.; PERES A. E. C.; VIANA, P. R. M.; OLIVEIRA, J. F. Flotação de minérios de ferro. In: CHAVES, A. P. (Org.) **Teoria e prática do tratamento de minérios: A flotação no Brasil**. São Paulo: Signus, 2009, v. 4, 2ª edição, 484p.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no tratamento de minério**. Departamento de Engenharia de Minas - UFPE, Recife-PE, Brasil, 2008.

BOBBIO, P. A, BOBBIO, F. O. (1995).Carboidratos. In: Química do processamento de alimentos. Editora Varela, 2a edição, São Paulo, p.47-77.

CARVALHO, M. R. **Interferência de Cátions Ca^{2+} Nas Etapas de Deslamagem e Flotação de Minério de Ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2003. 57p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

CEREDA, M.P., Culturas de tuberosas amiláceas latino-americanas: Propriedades Gerais do Amido, 1ª Edição. Campinas. Edição: Fundação Cargill, 2001. Volume 1, 221p.

CHAVES, L. C. **Estudo de resíduos sólidos gerados na mineração de ferro: Decomposição de aminas**. Dissertação de Mestrado. UFOP, Programa de PósGraduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Ouro Preto-MG, 2001.

COUTO, M. L. F., **Caracterização de alumínio e fósforo em minério de ferro**. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, 2009. 102p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

DANA, J. D. Manual de Mineralogia. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora S. A, 1974. 642 p.

DENARDIN, C. C., DA SILVA, L.P., **Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas**. Revista Ciência Rural, Volume. 39, n.3, mai-jun, 2009. Universidade Federal de Santa Maria – RS

DETLEF, H. G. W. **Principais Depósitos Minerais do Brasil**. Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, Brasília, DF, Cap. 5, p. 3-6, 1986.

HENRIQUES, A. B., **Caracterização mineralógica e propriedades eletrocinéticas de hematitas do Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2009, 145p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

HENRIQUES, A. B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. 223p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

JESUS, C. A. G. Ferro. **Sumário Mineral**, Brasília, v. 35, p. 66-67, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015.

KLEIN, C., Mineral Science, 2ª edição, New York, p.380-382, 2001.

LEJA, J.; *Surface Chemistry of Froth Flotation*. New York: Plenum Press, 758p., 1982;

LOPES, G. M. L. **Flotação direta de minério de ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2009. 176p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

LUZ, A.B e LINS, F. A. F., introdução ao tratamento de minérios. In: **Tratamento de Minérios** (Luz, A. B., Sampaio, J. A., França, S. C. A., Editores), CETEM/MCTI, 5a Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2010. p.3-18.

MARIA, R. C. **Otimização Técnico-Econômica de Circuitos de Flotação**. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009. 109p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas).

MARQUES, M. L. S. **Comportamento de Minérios de Ferro na Concentração por Flotação na Presença de Lamas**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 88p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).

MASSI, L. et al. Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas. **Química nova na escola**, São Paulo, n. 28, p.20-23, mai. 2008. Disponível em: <http://webeduc.mec.gov.br/portaldoprofessor/quimica/sbq/qnesc28/05-ccd-7106.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2017.

MONTE, Marisa Bezerra De M.; PERES, Antônio Eduardo C., **Química De Superfície Na Flotação**. In: Adão Benvindo da Luz; João Alves Sampaio; Sílvia Cristina A. França. (Editores), Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 399 – 457, 2010.

MONTENEGRO, C. B. et al. **Estudo da adsorção do ácido acético pelo carvão ativado. Isotérmica de adsorção. Determinação de uma área específica. Física aplicada** - Aulas Laboratoriais. Faculdade de Farmácia da Universidade do Porto: Porto, Portugal. 2013. Disponível em: <http://qa.ff.up.pt/fa2016/pdf/fa-tl01.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2017.

MOREIRA, W. R. **Fonte de Amido Aplicáveis à Flotação de Minério de Ferro**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 127p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

NASCIMENTO D. R. **Flotação aniônica de minério de ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. 116 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas).

NEDER, E. E. e LEAL FILHO, L. S.; **Uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros**. In: Anais do XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Natal, RN, v.1, p-395-404, 2005.

OLIVEIRA, P. S. **Rotas para Recuperação de Ferro Fino Contido no Underflow do Espessador de Lama da Usina de Conceição**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 113p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

PERES, A. E. C. e ARAUJO, A. C., **A flotação como operação unitária no tratamento de minério**. In: Arthur Pinto Chaves. (Organizador), Teoria e prática do tratamento de minérios: A flotação no Brasil. 2 ed. São Paulo, Brasil: Signus Editora, p. 7- 30, 2009.

PERES, A.E.C., SALUM, M.J.G., VALADÃO, G.E.S., DE ARAUJO, A.C.. **Métodos de Concentração**. In: VALADÃO, G.E.S., DE ARAUJO, A.C., ORGANIZADORES. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ª Reimpressão. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. Volume Único, Capítulo 6, páginas 117-135.

QUARESMA, L. F. Ferro. **Balanco Mineral Brasileiro 2001**. 2001. 27p. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-ferro>>. Acesso em: 23 maio. 2012.

RASO, E. F., **Estudo de desempenho de codepressores na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2014. 155p. (Dissertação, Mestrado em Ciência e Tecnologia das radiações, Minerais e Materiais).

REIS, O. B. **Estudo Preliminar Sobre Reciclagem Das Aminas Utilizadas Em Flotação De Minério De Ferro**. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. 63. (Dissertação, Mestrado em Recursos Hídricos).

SABLEVICIENE, D., KLIMAVICIUTE, R., BENDORAITIENE, J., ZEMAITAITIS, A.(2005) Flocculation properties of high-substituted cationic starches. Colloids.

SILVA, G. R. **Caracterização, estudos fundamentais e flotação de minério de ferro goethítico**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2014. 214p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SMITH, R. W., AKHAR, S. **Cationic flotation of oxides and silicates**. In: Fuerstenau, M. C. Editor. Flotation A.M. Gaudin Memorial Volume. Volume 1. Chapter 5. p. 87-116. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering, Inc. New York. 621p. 1976.

TURRER, H. D. G. **Polímeros Depressores na Flotação de Minério de Ferro**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 171p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

WEISSENBORN, P.K., WARREN, L.J., DUNN J.G. (1995) Selective flocculation of ultrafine iron ore. 1. Mechanism of adsorption of starch onto hematite. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.99, p.11-27.