

## 1. INTRODUÇÃO

A extração e a transformação de minérios representam um segmento de grande significado econômico para o Brasil. Dentre os bens minerais que mais se destacam nesse cenário está o minério de ferro, por conter um dos elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre e de maior aplicação na vida do homem.

Com a elevada demanda de minério de ferro, impulsionada pelo crescimento econômico mundial dos últimos anos, as mineradoras tem se empenhado na busca constante por melhor aproveitamento de suas reservas minerais. Por consequência, a exploração de reservas de minérios cada vez mais pobres, antes tidos como não econômicos, tem sido justificada.

Diferente dos minérios de ferro com alto teor, que geralmente são submetidos apenas a etapas de cominuição e classificação, os minérios de ferro mais pobres, demandam, além das etapas de cominuição e classificação as etapas de concentração, que tem como objetivo alcançar as especificações exigidas pelo mercado, tornando o seu beneficiamento mais complexo e mais oneroso.

Os principais métodos de concentração aplicados industrialmente para o tratamento de minério de ferro são os métodos gravíticos, magnéticos e a flotação catiônica reversa, O presente trabalho descreve de forma resumida o processo de concentração por flotação catiônica reversa que é o principal método mundialmente utilizado para concentração do minério de ferro.

## **2. OBJETIVO**

O presente trabalho tem por objetivo a exposição de forma genérica, do processo de concentração de minério de ferro por flotação, apresentando, juntamente com suas aplicações, os equipamento e insumos envolvidos no processo.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Aspectos Gerais**

Os minérios de ferro juntamente com seus produtos semi-elaborados possuem grande representatividade na economia da mineração brasileira.

A constante e intensa exploração de minérios de ferro de elevados teores, que em geral são submetidos simplesmente às operações de cominuição, classificação e deslamagem, culminaram com o esgotamento da maioria das reservas, resultando no desenvolvimento de técnicas que possibilitassem o aproveitamento de minérios de granulação fina, de baixos teores de ferro e elevados teores de ganga.

É importante ressaltar que atualmente os mercados interno e externo de minérios de ferro, também se caracterizam por crescentes exigências de qualidade. As especificações para as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas dos minérios de ferro acompanham, em termos de qualidade, o desenvolvimento tecnológico do setor siderúrgico e dos seus produtos que são colocados à disposição dos mercados consumidores finais. O crescimento do número de usinas siderúrgicas que utilizam processos de redução direta, em detrimento ao processo convencional de alto-forno, sinaliza para a necessidade de melhoria de qualidade da matéria prima utilizada pelo setor siderúrgico.

Não bastando melhoria contínua da qualidade dos produtos, as empresas precisam estar atentas à economicidade de suas operações, pois as margens obtidas com a comercialização das produções ressaltam a necessidade da aplicação dos conceitos básicos inerentes à produtividade. Certamente, a conquista da produtividade, ou seja, aprimoramento de qualidade e obtenção de resultados econômicos satisfatórios tem como caminho o desenvolvimento dos processos produtivos.

O processamento mineral pode ser definido como o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria prima mineral (minério bruto) objetivando obter produtos comercializáveis. As principais técnicas de concentração empregadas se resumem basicamente em:

- processos de concentração gravítica: baseiam-se na diferença de densidade entre as espécies minerais. Exemplos são os que utilizam jiges e espirais;
- processos magnéticos: baseiam-se na diferença de susceptibilidade magnética entre as espécies minerais;
- flotação: baseia-se na diferença de propriedades de superfície entre as espécies minerais.

Portanto, a caracterização tecnológica de minérios é uma abordagem de extrema importância e de imediato retorno, em função de um mercado siderúrgico cada vez mais exigente, que leva em consideração que os minérios estão cada vez mais pobres e com elevada complexidade textural, estrutural, química e mineralógica, além da necessidade de um máximo aproveitamento de recursos minerais considerando as questões ambientais e econômicas.

### 3.2 Gênese do Minério de Ferro

As formações ferríferas distribuídas por todo mundo pertencem às idades pré-cambriana e fanerozóica. Os depósitos de ferro existentes podem ser agrupados em duas categorias: formações ferríferas bandadas (*"Banded Iron Formation"*–*BIF*) formadas no proterozóico e os *"Ironstones"* de idade fanerozóica. As formações ferríferas bandadas constituem os depósitos de maior ocorrência/distribuição e aproveitamento econômico, sendo caracterizados por finos leitos paralelos com espessuras entre 3 e 5 milímetros, que se constituem de sílica na forma de "chert" ou de sílica cristalizada na forma de quartzo, alternado com camadas de minerais de ferro (EVANS, 1983).

Segundo CASTRO (1993), as formações ferríferas bandadas foram formadas a partir da precipitação de hidróxido de ferro que carregou alguma sílica coloidal, tendo o precipitado  $\text{Fe}(\text{OH})_3\text{-SiO}_2$  atingido o fundo da bacia em pulsos de 12 horas, com o  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  expulsando o  $\text{SiO}_2$  para cima. Este processo levou a formação de uma camada rica em óxido e outra rica em sílica. A existência de uma litosfera e uma hidrosfera anóxicas no período Pré-Cambriano, somada ao fato de existir ferro

ferroso solúvel na água do mar, contribuiu para a formação das BIF's. (*Banded Iron Formation*).

### **3.3. Principais Depósitos de Ferro Brasileiros**

Os principais depósitos de ferro brasileiros estão localizados nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul, estando localizadas no primeiro as maiores reservas de minério de ferro.

#### **3.3.1. Depósitos do Quadrilátero Ferrífero – MG**

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na parte central de Minas Gerais, com vértices noroeste em Itabira, sudeste em Mariana, sudoeste em Congonhas e nordeste em Itaúna, com área aproximada de 7000km<sup>2</sup>. Sua coluna estratigráfica é composta pelo Super grupo Rio das Velhas e Minas e Grupo Itacolomi. Os minérios do Quadrilátero Ferrífero são classificados em itabirito comum, itabirito dolomítico, itabirito anfíbolítico e minérios de alto teor.

## **3.4 Beneficiamento Mineral**

### **3.4.1 Conceitos Básicos**

O beneficiamento mineral é constituído por uma série de operações com o objetivo de modificar a granulometria e a concentração das espécies minerais que se deseja, sem que haja alteração na identidade química.

As operações realizadas no beneficiamento de um mineral incluem a cominuição, classificação, concentração e separação sólido/líquido entre outras operações auxiliares. Estas operações são arranjadas sequencialmente de modo a maximizar a

recuperação dos minerais úteis presentes no minério e ajustar os produtos obtidos à qualidade desejada (VALADÃO e ARAUJO, 2007).

Três condições básicas precisam ser atendidas para o processo de concentração de minerais, são estas: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica. As operações de cominuição (britagem e moagem), intercaladas com etapas de classificação, proporcionam a liberação dos grãos dos diferentes minerais. A separabilidade dinâmica está diretamente ligada aos equipamentos empregados.

No processo de flotação, a diferenciabilidade está associada à modificação e controle das características da superfície dos minerais. Neste processo os mecanismos capazes de manter as partículas em suspensão e de possibilitar a aeração da polpa caracterizam as máquinas de flotação (PERES, 2003)

### **3.5 Concentração de Minério de Ferro por Flotação**

Os minérios de ferro extraídos no Brasil atualmente, pertencem a dois grandes grupos. O primeiro grupo inclui os minérios hematíticos. Este tipo de minério está relacionado com enriquecimento supergênico e é usado para a produção de minérios de ferro mais grossos, tais como *lump* e *sinter feed* (ARAUJO e PERES, 1995).

O segundo grupo inclui os minérios itabiríticos com menor teor de ferro e que necessitam na grande maioria das vezes de etapas de concentração para a produção de concentrados que atendam as especificações de mercado. Itabiritos apresentam tamanho menor de liberação e em geral necessitam ser concentrados por flotação (ARAUJO e PERES, 1995).

### 3.5.1 Aspectos Históricos

No início do século XIX surgiram as primeiras patentes relacionadas ao processo. Em 1860 na Inglaterra, Hayness patenteou a flotação em óleo (*bulk oil flotation*). Entretanto, esse processo não teve aplicação industrial imediata na época.

Em 1905, a empresa *Minerals Flotation*, na Austrália, conseguiu tratar mais de um milhão de toneladas de minério de chumbo e zinco da *Broken Hill* utilizando a concentração por flotação. Uma das grandes vantagens resultantes do método foi a possibilidade de tratamento de uma maior massa de minério.

Nos EUA, o processo chegou em 1911. No começo, as empresas americanas de mineração utilizavam a flotação para recuperar os rejeito finos da separação gravítica. A flotação, desse modo, permitia um considerável aumento de recuperação. Ao longo do tempo, os processos de flotação passaram a substituir quase que completamente os métodos gravíticos na recuperação de minerais metálicos.

O método surgiu no Brasil nos anos cinqüenta, sendo utilizado primeiramente no tratamento de minério de chumbo na cidade de Panelas próxima à divisa do Paraná com São Paulo (DE ARAUJO & PERES, 1995). Nos anos sessenta, após o *start-up* do concentrador de minério fosfático da Serrana, o número de concentradores cresceu rapidamente.

Atualmente no Brasil é utilizado o método de flotação para o tratamento de minerais de ferro, fosfato, nióbio, ouro, cobre, zinco oxidado, chumbo-zinco, grafita, carvão, potássio, níquel, fluorita, magnesita, feldspato, barita, talco, tungstênio e resíduo hidrometalúrgico contendo prata.

DOS REIS (2004) relata que a primeira operação de concentração de minério de ferro por flotação direta foi na mina de *Humboldt, Michigan, EUA*, pertencente à *Cleveland Cliffs Iron Company*. Essa mina atualmente encontra-se desativada.

A concentração de minérios de ferro de baixo teor iniciou-se com a flotação aniônica direta dos minerais de ferro, usando-se sulfonato de petróleo em conjunto com óleo combustível, ácidos graxos e hidroxamatos como coletores. Esse método é pouco utilizado atualmente, tendo sido substituído, com sucesso, pela flotação catiônica reversa, a partir dos anos sessenta (HOUOT, 1983).

### **3.5.2 Aspectos Teóricos**

Flotação em espuma, ou simplesmente flotação, é um processo de concentração aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as várias espécies minerais presentes, tratando misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa, nas quais se introduz uma fase gasosa (PERES, 1980).

A seletividade do processo de flotação está baseada no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar diferentes graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água. Ao contrário, partículas hidrofílicas possuem grande afinidade com a água.

Em termos de polaridade, os compostos químicos dividem-se em polares e apolares, em função de apresentarem ou não um dipolo permanente. A importância da polaridade reflete-se no fato de que existe afinidade entre substâncias ambas polares ou ambas apolares (ou não-polares), não havendo, geralmente, afinidade entre uma substância polar e outra apolar. Nos sistemas de flotação, a fase líquida é sempre a água, uma espécie polar, e a fase gasosa é quase sempre o ar, constituído por moléculas apolares (PERES et al. 1980).

Induzindo a passagem de um fluxo de ar através de uma suspensão aquosa contendo duas espécies, teoricamente, é possível provocar a separação entre as partículas naturalmente hidrofóbicas e partículas naturalmente hidrofílicas. As partículas que não possuem afinidade com a água, as hidrofóbicas, seriam carreada



pelo o ar e as partículas hidrofílicas, que possuem afinidade com água, permaneceriam em suspensão.

É importante ressaltar, que a mera passagem de um fluxo de ar não é suficiente para carrear as partículas hidrofóbicas. Faz-se necessária a formação de uma espuma estável, que é obtida através da ação de reagentes conhecidos como espumantes, os quais abaixam a tensão superficial na interface líquido/ar e têm ainda a importante função de atuar na cinética da interação partícula/bolha, fazendo com que o afinamento e a ruptura do filme líquido ocorram dentro do tempo de colisão (PERES et al. 1980).

Entre os minerais encontrados na natureza, a minoria são naturalmente hidrofóbicos (grafita, molibdenita, talco, pirofilita, alguns carvões e ouro nativo livre de prata). Esse pequeno número de minerais naturalmente hidrofóbicos seria indicativo de uma gama restrita de aplicações da flotação. A grande aplicação industrial da técnica só é possível porque os minerais naturalmente hidrofílicos podem ter sua superfície transformada em hidrofóbica através da adsorção de reagentes conhecidos como coletores. Isso significa que, a propriedade diferenciadora pode ser induzida.

Para um circuito de flotação, o tamanho máximo da alimentação pode ser estabelecido em função do tamanho de liberação do mineral útil. Portanto, em alguns casos, este tamanho é limitado pela força de adesão entre partícula e bolha (LEJA, 1982). Ou seja, o fluxo ascendente de bolhas não consegue carrear partículas muito grandes. O limite inferior da faixa granulométrica é fixado em função do tamanho em que iniciam efeitos deletérios ao sistema, como o recobrimento de partículas maiores por lamas ou o consumo exagerado de reagentes devido à grande área superficial específica das partículas menores (MONTE & PERES, 2002).

A concentração de minérios de ferro por flotação é uma técnica já mundialmente consolidada para partículas minerais na faixa de 10 a 250 $\mu$ m (HOUOT, 1983). Para minério de ferro, principalmente com baixo teor, o método de concentração mais utilizado é a flotação catiônica reversa, também conhecido como flotação reversa.

DE ARAUJO & PERES (1995) ressaltam que a probabilidade de ocorrer a flotação de uma dada partícula mineral é descrita como sendo um produto de três probabilidades individuais, conforme apresentado na equação a seguir:

$$P = P_A * P_C * (1 - P_D)$$

Onde:

P = probabilidade de flotação;

P<sub>A</sub> = probabilidade de adesão entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar;

P<sub>C</sub> = probabilidade de colisão bolha-partícula;

P<sub>D</sub> = probabilidade do rompimento bolha-partícula.

A probabilidade de adesão (P<sub>A</sub>) está relacionada ao ambiente químico predominante em um dado sistema de flotação, ou seja, essa probabilidade poderá ser influenciada pela mineralogia, reagentes e condições da polpa, sendo controlada predominantemente pelas forças superficiais. O tamanho da partícula, da bolha e a turbulência do sistema, tem influência direta na probabilidade de colisão (P<sub>C</sub>). As outras duas probabilidades são governadas pela hidrodinâmica do sistema de flotação.

Para o processo de flotação reversa de minério de ferro o pH chamado ótimo está na faixa de 9,5 a 10,5, onde a superfície do quartzo é altamente negativa e há a maior diferença das cargas superficiais entre a hematita e o quartzo (NUMELA E IWASAKI, 1986). Na figura 3.1 visualiza-se o potencial zeta da hematita e do quartzo em diferentes valores de pH.

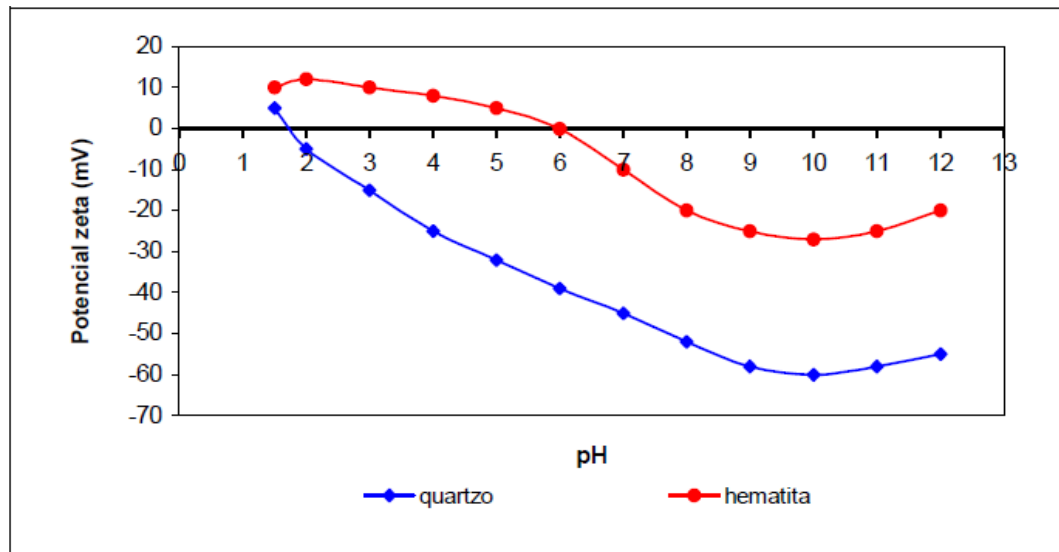


Figura 3.1 – Potencial zeta do quartzo e da hematita em função do pH (VIEIRA, 1995).

Como observado na figura 3.1, na faixa de pH de 9,5 a 10,5 incide a maior diferença entre as cargas superficiais da hematita e do quartzo. Porém, essa diferença não é isoladamente suficiente para uma flotação seletiva, o que torna necessário a adição de reagentes.

### 3.5.3 Reagentes Utilizados na Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro

Reagentes de flotação são compostos orgânicos e inorgânicos adicionados com o objetivo de controle das características das interfaces envolvidas no processo. De acordo com sua função específica em um sistema de flotação, os reagentes podem ser divididos em coletores, espumantes e modificadores ou reguladores. As ações dos modificadores são diversas, destacando-se: ajustar o pH do sistema, controlar o estado de dispersão da polpa, facilitar e tornar mais seletiva a ação do coletor (função designada como ativação) e tornar um ou mais minerais hidrofílicos e imunes à ação do coletor, função conhecida como depressão. Quimicamente os coletores e espumantes são classificados como surfatantes. Os surfatantes são constituído de moléculas de caráter duplo (anfipática) constituídas de um grupo não polar e um grupo polar, (PERES, 2001).

Surfactantes exercem dois papéis principais em flotação. Primeiro, adsorvendo na interface sólido/líquido, transformam em hidrofóbica a superfície de certos minerais, agindo assim como coletores. Segundo, influenciam na cinética da ligação bolha/mineral, agindo como espumantes (COELHO et al., 1980).

No caso da flotação catiônica reversa de minério de ferro utiliza-se como depressor o amido de milho ou mandioca e como coletor a amina.

BALAJEE & IWASAKI (1969) concluíram, através de estudos de adsorção de amido, em minérios de ferro, que a flotação seletiva entre o quartzo e a hematita em pH 10,5, usando amido como depressor da hematita e amina como coletor do quartzo, é possível porque o amido adsorve-se preferencialmente sobre a superfície da hematita, em relação ao quartzo e a densidade de adsorção da amina sobre a superfície do quartzo é maior que a densidade de adsorção deste reagente sobre a superfície da hematita. Estudos semelhantes realizados por LIMA (1997) indicaram ainda que a quantidade de amina que se adsorve na superfície da hematita, contendo amido previamente adsorvido, é insuficiente para torná-la hidrofóbica e a quantidade de amido adsorvido sobre o quartzo, também, é insuficiente para manter o caráter hidrofílico do mineral após adsorção da amina.

### **3.5.3.1 Amido / Depressor**

Os amidos são constituídos basicamente, de dois compostos de composição química semelhante e estruturas de cadeia distintas:

- amilose um polímero linear no qual as unidades  $\alpha$ -D-glicose se unem através de ligações  $\alpha$ -1, 4 glicosídicas;
- amilopectina, um polímero ramificado no qual as ramificações se unem a cadeia principal através de ligações  $\alpha$ -1, 6 glicosídicas;

Na fração das diversas substâncias vegetais, ou mesmo no caso de variedades de um mesmo vegetal, a proporção amilopectina / amilose pode diferir bastante. No caso do amido de milho, a relação 3/1 prevalece para as modalidades comuns do

milho amarelo. A composição da fração amilácea se aproxima de amilopectina pura no caso do milho ceroso (PERES, 2001).

Os chamados amidos de milho não-modificados tem como característica essencial um alto peso molecular. Além da alta hidrofiliabilidade das macromoléculas em função da presença dos grupos OH na unidade básica, a glicose, o tamanho da molécula faz com que ela se estenda na solução passando a agir como “ponte” entre as partículas minerais na polpa. Essa ação é designada como floculação.

Através de um processo denominado dextrinização, que ocorre pela ação da temperatura, hidrólise ácida ou de certas enzimas os amidos de milho podem ser modificados. As dextrinas mantêm a proporção amilopectina/amilose da molécula original mas, devido ao tratamento recebido, sofrem uma drástica redução do número  $n$  de unidades de glicose. A estrutura resultante, de peso molecular variável entre, aproximadamente, 7.000 e 30.000, mantém sua hidrofiliabilidade mas é muito curta para estabelecer “pontes” entre as partículas. Adsorvendo-se sobre as partículas minerais as dextrinas agem como dispersantes. É importante esclarecer que tanto os amidos não-modificados quanto as dextrinas são capazes de hidrofilar as superfícies dos minerais sobre os quais se adsorvem, agindo portanto como depressores. (Peres, 2001)

### **3.5.3.2 Amina / Coletor**

Coletores são compostos orgânicos que tem como função a transformação dos minerais naturalmente hidrofílicos em minerais hidrofóbicos. Suas moléculas possuem um grupo polar (“cabeça polar”) e uma cadeia hidrocarbônica não-polar. A cadeia carbônica tem elevadas propriedades hidrofóbicas e a cabeça polar apresenta propriedades hidrofílicas reagindo com a água. Através da intensidade e natureza da carga iônica, pode-se classificar os coletores em catiônicos (positivo), aniônicos (negativo), não iônicos (sem carga) e anfotéricos (positivos em pH ácido e negativo em pH alcalino), (NEDER e LEAL FILHO, 2006). Para flotação de minério de ferro, os coletores catiônicos são os mais utilizados (MILLER, 1999). Dentre estes os

de maior importância são as aminas, sendo as primárias as mais usadas na indústria.

As aminas podem ser classificadas como primárias, secundárias, terciárias ou quaternárias dependendo do número de radicais hidrocarbonetos ligados ao átomo de nitrogênio. Se apenas um grupo hidrocarboneto está presente com 2 átomos de hidrogênio, a amina é denominada amina primária. Da mesma forma, aminas contendo 2, 3 ou 4 grupos hidrocarbonetos são denominadas aminas secundárias, terciárias ou quaternárias (FUERSTENAU; MILLER e KUHN, 1985).

Na Figura 3.2 são apresentadas as estruturas da amônia, amina primária, secundária, terciária e quaternária.

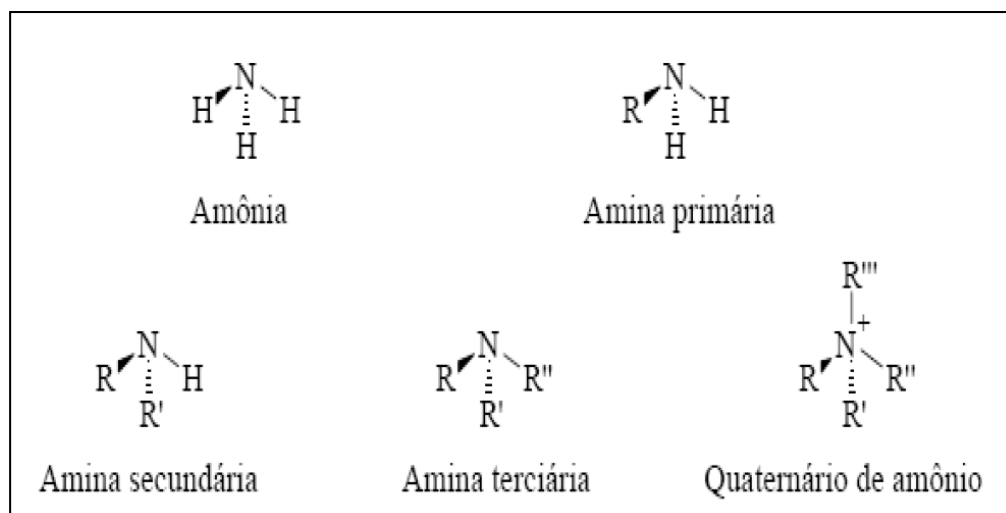


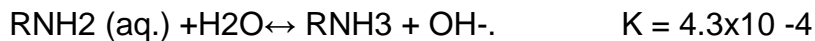
Figura 3.2 – Estrutura molecular da amônia, amina primária, secundária, terciária e quaternária (NEDER e LEAL FILHO, 2006).

Aminas primárias, secundárias e terciárias são bases fracas, ao contrário das aminas quaternárias que são bases fortes e estão completamente ionizadas em todos os valores de pH, enquanto a ionização das demais aminas depende do pH (FUERSTENAU, 1985).

Segundo VIANA (2006) as aminas apresentam propriedades de eletrólitos fracos dissociando-se em solução aquosa, predominando a forma molecular ou iônica em

função do pH da solução. Em faixa de pH ácida ou pouco alcalina predomina a espécie iônica enquanto que em faixa de pH mais alcalina predomina a espécie molecular.

A ionização das aminas ocorre em solução aquosa por protonação. No caso da dodecilamina:



Em sistemas saturados,



Na Tabela 3.1, a seguir, são apresentados os principais coletores catiônicos usados em flotação de minério de ferro (LEJA 1983).

Tabela 3.1 – Principais coletores catiônicos usados em flotação de minério de ferro, (LEJA, 1983).

Coletor	Fórmula Estrutural
Sal de amina graxa primária	$\text{RNH}_3^+\text{Cl}^-$
Sal de amina graxa secundária	$\text{RR}'\text{NH}_2^+\text{Cl}^-$
Sal de amina graxa terciária	$\text{R}(\text{R}')_2\text{NH}^+\text{Cl}^-$
Diamina graxa	$\text{R-NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Éter-diamina	$\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Éteramina	$\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Sal de eteramina	$[\text{R-O}(\text{CH}_2)_3-\text{NH}^+] [\text{CH}_2\text{COO}^-]$
Sal de sulfônio	$\text{R}(\text{R}')_3\text{NCl}$
Sal de amônio quaternário	$\text{RS}(\text{R}')_2\text{Cl}$

Nota: *R*= cadeia hidrocarbônica com 10 átomos de carbono, *R'* = cadeia alquílica curta, geralmente Metil

Na flotação, os coletores utilizados apresentam de  $C_6$  a  $C_{20}$  carbonos na cadeia; homólogos mais curtos que  $C_6$  não apresentam suficiente atividade superficial enquanto que aqueles superiores a  $C_{20}$  tornam-se excessivamente insolúveis chegando em alguns casos a se tornarem pastosos (SILVA, 2004). As aminas utilizadas na flotação catiônica reversa de minérios de ferro são parcialmente neutralizadas com ácido acético, para aumentar sua solubilidade em água. O grau de neutralização, que leva a um melhor desempenho, situa-se entre 25% e 30% (VALADÃO e ARAUJO, 2007).

As aminas secundárias  $R_1R_2NH$  e terciárias  $R_1R_2NR_3$  não são tradicionalmente empregadas como coletores de flotação, embora apresentem alta potencialidade para a função. Os sais quaternários de amônio têm sido utilizados em escala de laboratório, especialmente quando se deseja investigar o efeito de um coletor catiônico totalmente dissociado em toda faixa de pH (SILVA, 2004).

Magriotis (1995) relata que não há fórmula rápida e fácil para se selecionar um coletor específico para uma dada operação de flotação. Há seis fatores, entre outros, que afetam a resposta de um coletor catiônico. Esses fatores são: tamanho de partícula, deslamagem do minério, condicionamento dos reagentes, densidade da polpa, química da água e temperatura da água. Através dos resultados obtidos no seu trabalho verifica-se que: as eteraminas atuaram como bons coletores na flotação reversa do minério de ferro itabirítico estudado; quatro eteraminas de diferentes fabricantes, mesmo semelhantes em composição química e tipo de neutralização, podem fornecer resultados diferentes e eteraminas funcionam como bons coletores quando em combinação com querosene.

### **3.5.3.3 Espumantes**

Espumantes são compostos tensoativos heteropolares contendo um grupo polar e um radical hidrocarbônico, capazes de adsorver na interface ar-água. As moléculas do espumante se arranjam na interface ar-água de forma que o grupo polar ou hidrofílico é orientado na fase aquosa, e o grupo hidrofóbico ou a cadeia de hidrocarboneto não polar na fase ar (BULATOVIC, 2007). Os espumantes reduzem a tensão superficial da interface ar-água e formam um envelope em torno das bolhas,



umentando sua estabilidade, conseqüentemente, melhorando as condições para a coleta das partículas do mineral hidrofobizado (BULATOVIC, 2007 e CHAVES et al., 2010).

As aplicações de espumas na separação de fases são de relevante importância prática. A própria designação flotação em espuma ("froth flotation") enfatiza este fato.

Bolhas podem ser geradas em líquidos através de:

- i. aumento na temperatura, que causa fervura (inicialmente ocorre a liberação de gases dissolvidos e posteriormente geração de bolhas de vapor);
- ii. redução de pressão que causa precipitação de bolhas (liberação de gases dissolvidos);
- iii. agitação mecânica resultando no aprisionamento de gases;
- iv. injeção de gás sob pressão por um orifício ou membrana porosa.

Uma vez formadas em um líquido puro as bolhas tendem a coalescer (redução da área superficial total e, portanto, da energia livre do sistema) e, se livres, a subir no líquido (segundo o princípio de Arquimedes). A coalescência pode ser prevenida por "impurezas" ativas na superfície e a ascensão pela adesão a superfícies sólidas hidrofóbicas.

A estrutura dos espumantes é similar a dos coletores e a diferença está no caráter funcional do grupo polar. O radical dos coletores é quimicamente ativo e capaz de interagir elétrica ou quimicamente com a superfície do mineral. Os espumantes por sua vez, têm um radical liofílico de grande afinidade pela água. Assim os coletores tendem a migrar para a interface sólido-gás e os espumantes para a interface líquido-gás (CHAVES et al., 2010). No caso da flotação catiônica reversa de minérios de ferro, os coletores utilizados, as éteraminas, também têm ação de espumante.

Segundo Silva (2004) e Silva (2008), de acordo com seus estudos sobre a interação entre coletores da flotação de minérios de ferro (éter aminas) e outros espumantes,

a interação para a flotação pode ser tanto positiva quanto negativa dependendo do espumante utilizado. Isso significa dizer que parte do coletor pode ser substituído por espumantes, que geralmente, possuem menor custo.

### 3.5.4 Equipamentos

As máquinas ou células de flotação utilizadas na concentração de minérios de ferro se enquadram em uma das classes: (A) máquinas mecânicas e (B) colunas de flotação.

(A) - Em uma célula mecânica é importante salientar três funções básicas:

- O rotor ou impelidor, além de manter as partículas suspensas na polpa, é responsável pela criação de uma região de alta turbulência que aumenta a probabilidade de colisão partícula-bolha;
- O dispersor ou difusor quebra o jato de ar em pequenas bolhas;
- O estator gera uma transição entre a região de alta turbulência nas proximidades do rotor e o restante da máquina, que requer menor turbulência de forma a manter a estabilidade do agregado partícula bolha.

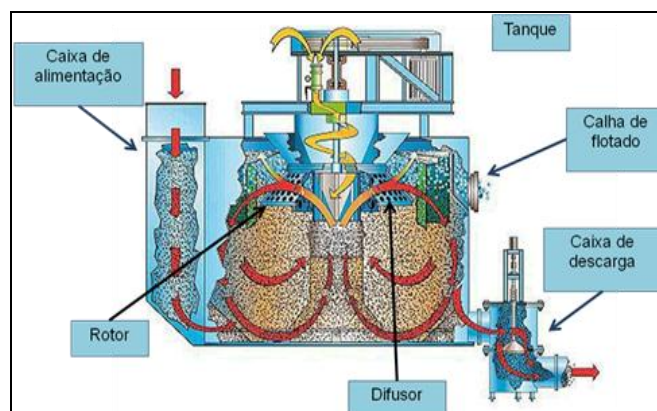


Figura 3.3 – Célula Mecânica de Flotação (Curso de Flotação IETEC 2011)

(B) A coluna de flotação difere da célula mecânica convencional principalmente em 4 aspectos básicos:

- Geometria (relação altura: diâmetro efetivo);
- Água de lavagem;
- Ausência de agitação mecânica;
- Sistema de geração de bolhas.

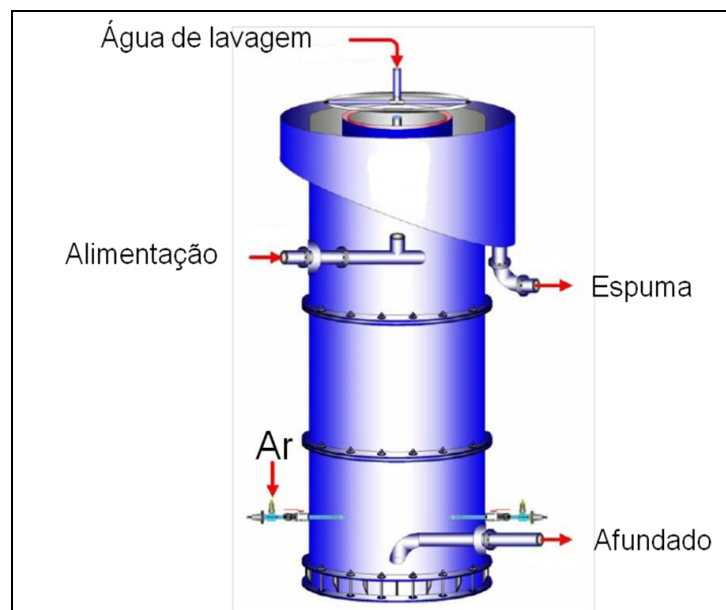


Figura 3.4 – Colunas de Flotação (Curso de Flotação IETEC 2011)

#### **4 CONCLUSÃO**

O processo de concentração de minério de ferro por flotação catiônica reversa é o processo que melhor se aplica para concentração de minérios itabiríticos, dada sua notória eficiência na recuperação do mineral.

O sucesso deste método está associado a uma série de fatores tais como os reagentes utilizados, tamanho da partícula, pH da solução, equipamentos utilizados e outros.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALAJEE, S. R. IWASAKI, I. (1969) **Adsorption Mechanism of Starches in Flotation and Flocculation of Iron Ores**. Transactions AIME, v.244, p.401-406  
 apud PAVLOVIC, S. (2002) Adsorção de carboidratos na superfície dos minerais hematita e quartzo. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

BULATOVIC, S. M. Handbook of flotation reagents – **Chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. 446p.

CASTRO, L. O. Propostas geológicas de 1993; Origens das formações ferríferas bandadas. Belo Horizonte: Editora Impressão Digital, p.59-78;

CHAVES, A. P., LEAL FILHO, L. S., BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Capítulo 10, p. 463-513.

COELHO, E. M.; A.E.C.; ARAUJO, A.C. Flotação, **Espessamento, Filtragem e Floculação Seletiva**. In memorian: Paulo Abib Andery. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. Recife, 1980. Capítulo 3, p. 205-286.

DE ARAUJO, A. C. & PERES, A. E. C. **Froth flotation: relevant facts and the Brazilian case**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995. (Tecnologia Mineral, 70).

DOS REIS, O. B. **Estudos preliminares sobre reciclagem das aminas utilizadas em flotação de minério de ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2004. 63p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Ambiental).

EVANS, A. **An Introduction to the ore geology**. In: Deposits of sedimentary and volcanic environments. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983, Capítulo 16, p.195- 213;

FUERSTENAU, M.C, MILLER, J. D., KUHN, M. C. **Chemistry of Flotation**. New York: Published by Society of Mining Engineers. 1985.

HOUOT, R. **Beneficiation of iron ore by flotation: review of industrial and potential applications**. International Journal of Mineral Processing, 1983, v.10, p.183-204.

LEJA, J. Surface chemistry of froth flotation. New York: Plenum, 1982.

LEJA, J. Flotation Surfactants. In: **Surface Chemistry of Froth Flotation**. 2nd Printing. New York and London: Plenum Press, 1983. Chapter 5, p. 279-294.

LIMA, R. M. F. (1997) **Adsorção de amido e amina na superfície da hematita e do quartzo e sua influência na flotação**. Tese de Doutorado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

MAGRIOTIS, Rísia Salgado. **Efeito do tipo de amina na flotação catiônica reversa de um minério itabirítico..** Dissertação de mestrado Curso de Pós graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte: UFMG, 1995.

MILLER, **Advances in Flotation Technology**. Edited by B.K Parekh and J.D. Miller. 1999.

MONTE, M. B. M., PERES, A. E. C. **Química de superfície na flotação**. In: Luz, A. B. ET al. Tratamento de minérios. 3.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002, Capítulo 9, p.339-407.

NEDER e LEAL FILHO (2006). **O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros**. Holos, Ano 22, maio 2006.

NUMELA, W. & IWASAKI, I. Iron Ore Flotation. In: **Advances in Mineral Processing**. Colorado: Ed. Littleton, SME, 1986, Chapter 18.

NUNES, ALINE. **Curso de Flotação**. IETC. 2011.

PERES, A. E. C., COELHO, E. M., de ARAÚJO, A. C. (1980) **Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva**. In: COELHO, E.M. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia; In Memoriam Prof. Paulo Abib Andery. Recife: ITEP-CNPq, p. 205-286.

PERES, A.E.C. Flotação. **Apostila do curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas**. Belo Horizonte - MG: Escola de Engenharia da UFMG, p. 2001- 303.

PERES, A.E.C.; **Processamento Mineral – Métodos de Concentração**. In: ABM. Minério de ferro: processos de obtenção e sua utilização na Siderurgia. Belo Horizonte, 2003. Capítulo 6, p. 196-251

SILVA, R. R. R. **Interação entre surfactantes na flotação de minérios de ferro**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 136p. Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG.

SILVA, Ronney Rogério Rodrigues. **Sistemas de Reagentes Surfataentes na Flotação Catiônica Reversa de Minérios de Ferro**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte:UFMG, 2004.

VALADÃO, G.E.S; ARAUJO, A.C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 234 p.

VIANA, P. R. M. **Flotação de Espodumênio, Microclina, Muscovita e Quartzo com Coletores Aniônicos, Catiônicos, Anfotéricos e Mistura de Coletores**. Tese Doutorado em Engenharia de Minas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

VIEIRA, A. M. **Flotação – Alguns Tópicos**. Curso Interno SAMARCO, 1995.