

# **Aplicação da flotação em coluna na concentração de minério de ferro de baixo teor**

**Daniel Guedes Nunes**

Bolsista de Iniciação Científica, Eng. Químico, UFRJ

**Hudson Jean Bianchini Couto**

Orientador, Eng. Químico, D. Sc.

**Silvia Cristina Alves França**

Co-orientadora, Eng. Química, D. Sc.

## **Resumo**

O objetivo do presente trabalho foi aplicar o processo de flotação em coluna na recuperação de finos de minério de ferro, visando diminuir a perda de ferro nas frações finas desse minério, comumente perdidas na flotação convencional. O minério de ferro utilizado provém da região de Salinas - MG, contendo baixo teor de ferro (21% de Fe em base mássica), constituído basicamente de hematita ( $Fe_2O_3$ ). As amostras de minério foram previamente preparadas antes de serem alimentadas no processo de flotação, por meio de moagem em moinho de bolas, seguido de um peneiramento para que 90% das partículas apresentassem um tamanho abaixo de 105  $\mu m$  (150 *Mesh*). Os ensaios conduzidos levaram a um alcance de 45% de teor de ferro no concentrado, mais que o dobro do teor de Fe da alimentação, obtendo-se uma recuperação metalúrgica acima de 70%, apenas numa etapa de flotação (*rougler*). Para efeito de comparação, utilizando a flotação convencional de bancada, foi obtido um teor de ferro equivalente, mas com recuperação metalúrgica de apenas 40%, nas mesmas condições. Pode concluir que o processo de flotação em coluna mostrou-se bastante promissor para enriquecimento de partículas finas de minério de ferro de baixo teor.

## **1. Introdução**

O processo de flotação vem sendo utilizado desde o início do século XX na separação seletiva de minerais, e mais recentemente, no tratamento de efluentes em escala industrial. Esse processo consiste na adesão de bolhas de ar introduzidas no sistema à fase dispersa (partículas), sendo o conjunto formado bolha-partícula carregado para a superfície da célula de flotação onde ocorre a recuperação das partículas.

Na área mineral, diversas partículas são encontradas na natureza na forma de óxidos, sendo utilizado no presente trabalho o óxido férrico, conhecido como hematita ( $Fe_2O_3$ ), principal minério para obtenção de ferro.

As colunas de flotação surgiram da necessidade de resolver os problemas de grandes perdas de partículas finas, perdidas na corrente de descarte de circuitos de flotação convencional. O principal motivo para essas perdas é que os equipamentos de flotação convencional geram bolhas com diâmetros de 600-3000 micrômetros, consideradas grandes para separação de partículas finas, ineficiências do processo amenizadas com a criação das colunas.

O processo de flotação baseia-se na separação de partículas sólidas por diferença de "hidrofobicidade", tendo como princípio o contato bolha-partícula, onde as partículas hidrofóbicas vão aderir à superfície da bolha e serão

carreadas para o topo da coluna. Para que este fenômeno de contato ocorra adequadamente é necessário a aplicação de alguns reagentes que possibilitem a aderência bolha-partícula, são eles:

- Coletores – substância química que adsorve na superfície das partículas dispersas na polpa de modo a conferir hidrofobicidade a estas.
- Ativador – substância utilizada para propiciar a adesão do coletor na superfície destas partículas.
- Depressor – agentes químicos que se depositam seletivamente na superfície das partículas e impedem a adesão dos coletores.
- Espumantes – substâncias que promovem a estabilidade e consistência das espumas formadas, impedindo a sedimentação do material já retido no topo da célula de flotação.
- Reguladores – responsáveis pela regulação do pH, que é uma das variáveis que afetam a eficiência de coleta.

Além de mais eficientes pelo tamanho de bolhas, as colunas se mostraram bem mais eficientes pela aplicação de água de lavagem no topo da célula de flotação, evitando o arraste de partículas hidrofílicas para a espuma (concentrado).

## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1. Materiais**

O material particulado escolhido para os estudos realizados foi a hematita ( $Fe_2O_3$ ), minério de grande importância na indústria siderúrgica de ferro. Os reagentes químicos utilizados no condicionamento foram: *tall oil* como coletor, silicato de sódio (VETEC) como depressor e ácido sulfúrico (VETEC) como regulador de pH.

### **2.2. Métodos**

#### **2.2.1. Preparação da amostra**

O material alimentado nas colunas de flotação foi previamente preparado para se adequar às condições ideais do processo. Partindo de cerca de 200 Kg de material, realizou-se o quarteamento e homogeneização do material para retirada de amostras representativas de todas as partículas ali presentes. Após a retirada de uma parte suficiente para realização de cada ensaio, aproximadamente 45 Kg, a amostra foi encaminhada para moagem em moinho de bolas. A moagem foi realizada com 80% de sólidos, rotação de 60 rpm, durante 1 hora. Posteriormente, o material moído foi classificado por peneiramento via úmida até que obtivéssemos 90% das partículas passante numa peneira Tyler de 150 Mesh (abertura de 105  $\mu m$ ), condição esta recomendada para o processo de flotação em coluna.

### 2.2.2. Determinação da distribuição de tamanho das partículas

A análise granulométrica do minério foi realizada através do procedimento clássico de peneiramento a úmido utilizando uma série de peneiras *Tyler*, com aberturas variando de 150 a 400 *Mesh*.

### 2.2.3. Determinação da massa específica das partículas

A massa específica das partículas ( $\rho_p$ ) foi determinada pela técnica de picnometria a gás hélio, utilizando-se o picnômetro Micromeritics, modelo AccuPyc 1330.

### 2.2.4. Determinação do teor de Fe

Devido à dificuldade de determinação do teor de ferro (% Fe) das amostras minerais por análise química, demandando muito tempo e um custo elevado, os teores foram obtidos por meio de uma técnica gravimétrica. Esta técnica consiste em determinar a massa específica média das amostras minerais, por picnometria a gás hélio, e utiliza-la no sistema composto pelas Equações 1 e 2 abaixo, obtida por balanço de massa, para cálculo do teor de Fe das amostras. No balanço de massa realizado foi considerando que apenas hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ) estão presentes nas amostras, consideração esta plausível visto que análises químicas mostraram que os demais constituintes (principalmente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{MgO}$ ) representavam, na maioria dos casos, menos de 5% em massa das amostras de estudo.

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{f_h}{\rho_h} + \frac{(1-f_h)}{\rho_s}} \quad (1)$$

$$\% Fe = 0,7 \cdot f_h \cdot 100 \quad (2)$$

Onde  $\rho_p$  é a massa específica média das amostras;  $\rho_h$  é a massa específica da hematita pura ( $5,2 \text{ g/cm}^3$ ),  $\rho_s$  é a massa específica da sílica pura ( $2,65 \text{ g/cm}^3$ ) e  $f_h$  a fração de hematita na amostra.

Da Equação 1 obtém-se a fração de hematita e da Equação 2 obtém-se o teor de ferro (% Fe). O fator 0,7 da Equação 2 representa a fração de ferro contida na hematita, de acordo com a razão entre a massa molar de ferro (Fe) e da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

### 2.2.5. Determinação da eficiência do processo

A eficiência do processo é avaliada em função do teor de ferro obtido no concentrado e, principalmente, em relação à recuperação metalúrgica de ferro no concentrado (RM) dada pela Equação 3, relacionada com a recuperação mássica de Fe no concentrado em relação ao Fe contido na alimentação.

$$RM (\%) = \left( \frac{\% Fe_{conc} \cdot m_{conc}}{\% Fe_{alim} \cdot m_{alim}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

onde  $\%Fe_{conc}$  e  $\%Fe_{alim}$  são os teores de ferro no concentrado e na alimentação,  $m_{conc}$  e  $m_{alim}$  são as massas coletadas do concentrado e alimentação, respectivamente.

## 2.2.6. Ensaios na coluna piloto de flotação

Toda a parte experimental do presente trabalho, incluindo os ensaios de flotação em coluna, foi realizada na Usina Piloto do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro – RJ, em regime de colaboração interinstitucional. O aparato experimental da coluna de flotação é composto basicamente pelos seguintes equipamentos: a coluna piloto de flotação propriamente dita de 2” de diâmetro interno por 6 m de altura (50,8 mm Ø x 6000 mm H) construída em acrílico com volume total de aproximadamente 13 L, painel de controle de vazão de água de lavagem e de ar através de rotâmetros (Cole-Parmer®, Modelo 102-05-N para ar e 044-40-N para água), regulador de pressão do ar, bombas peristálticas para alimentação e retirada de produtos (Cole-Parmer®, Modelo 7553-75), painel de controle elétrico de velocidade de bombas, sistema de controle automático de nível, sistema de dispersão do ar (dispersor poroso), tanque de condicionamento da polpa de alimentação, bomba peristáltica dosadora de reagentes (M. S. Mistura, Modelo 202), além de mangueiras e conexões acessórias.

As corridas experimentais na coluna de flotação foram realizadas com condições operacionais recomendadas na literatura especializada no tema (Aquino et al., 2004; Finch e Dobby, 1990) e pelo fabricante das colunas (Canadian Process Technologies Inc., 2007), de acordo com a Tabela 1.

No processo de flotação em coluna é comum utilizar um parâmetro operacional conhecido por *bias* para descrever a fração residual de água de lavagem que desce na camada de espuma (seção de limpeza). O *bias* é quantificado pela diferença entre a vazão de rejeito e vazão da polpa de alimentação, expressa em termos de velocidade superficial (Finch e Dobby, 1990).

Tabela 1. Condições operacionais utilizadas nos ensaios de flotação em coluna

Variáveis	Nomeclatura	Valores	Unidades
Tempo de residência médio	$t_{rm}$	15	(min)
Vazão de rejeito	$Q_{rej}$	756	(mL/min)
Bias	$J_b$	0,10	(cm/s)
Vazão de alimentação	$Q_{alim}$	633	(mL/min)
Vazão da água de lavagem	$Q_{água}$	245	(mL/min)
Vazão de ar	$Q_g$	1838	(mL/min)
Altura da camada de espuma	$h_e$	30	(cm)

A velocidade superficial de uma corrente é definida pela razão entre a vazão volumétrica e a área da seção transversal de escoamento (nosso caso, da coluna). Na etapa de condicionamento de reagentes foi utilizado 250 g/t de *tall oil* como coletor (que também possui características de espumante), dosado com o auxílio de uma bomba peristáltica de precisão, e 800 g/t de silicato de sódio como depressor (que também atua como dispersante), dosado diretamente no tanque de armazenamento da polpa de alimentação sob agitação mecânica.

### 2.2.7. Procedimento experimental

Os ensaios de flotação em coluna foram realizados conforme a sequência experimental a seguir:

- Inicialmente foram preparados cerca de 200 L de polpa de alimentação a 20% de porcentagem de sólidos em um tanque agitado com capacidade total de 300 L. Procedeu-se uma deslamagem por decantação da polpa para remoção das partículas muito finas, que prejudicam o processo de flotação, e ajuste do pH da polpa para 5,8.
- A coluna foi preenchida com água até a metade da altura total da coluna e, na sequência, o ar foi alimentado na base da coluna ajustado-se a vazão desejada através de um rotâmetro no painel de controle de vazões de ar e água de lavagem. A pressão na linha de alimentação de ar foi mantida em torno de 300 kPa (3 bar).
- Os reagentes químicos foram então adicionados, de acordo com as dosagens estabelecidas anteriormente em ensaios de bancada. Primeiramente foi adicionado o depressor silicato de sódio (800 g/t) no tanque de condicionamento da polpa e posteriormente foi dosado o coletor *tall oil* (250 g/t) em linha através de uma bomba dosadora. O pH da polpa foi corrigido e mantido em cerca de 5,8.
- Após a adição dos reagentes a polpa foi alimentada na coluna, na vazão pré-estabelecida, mantendo-se o seletor do painel de controle de nível no modo manual até que a altura do transdutor de pressão da coluna fosse alcançada pela polpa, quando o seletor era então ajustado para automático. O controle de nível da interface polpa-espuma foi realizado de forma indireta controlando-se a pressão em centímetros de coluna de água (cm H<sub>2</sub>O) no controlador PID do painel. Para manter uma altura de camada de espuma de 30 cm na coluna o *Set Point* (SV) era pré-ajustado no controlador em cerca de 50 cm H<sub>2</sub>O.
- Em seguida a água de lavagem era alimentada no topo da coluna, ajustando-se a vazão de trabalho no rotâmetro de água do painel.
- Após cerca de 1 hora de operação, tempo para a coluna entrar em regime permanente, a vazão de alimentação era checada e amostras de concentrado e de rejeito eram coletadas em bandejas durante 1 min, com intervalos de tempos pré-definidos entre uma coleta e outra (geralmente 15 ou 30 min). As amostras coletadas eram colocadas em estufa para secagem, depois pesadas e analisadas quanto ao teor de Fe, para posterior cálculo da eficiência do processo.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Caracterização da amostra de minério de ferro

#### 3.1.1. Distribuição de tamanho de partículas

Na Figura 1 é apresentada a distribuição de tamanho das partículas das amostras utilizadas nos ensaios 1 e 2, após etapa de preparação. Observa-se que cerca de 15% a 25% das partículas das amostras encontram-se

com tamanho abaixo de 37  $\mu\text{m}$  (400 *Mesh*) e 90% abaixo de 100  $\mu\text{m}$ , caracterizando-se como amostras de granulometria fina com estreita faixa de tamanhos.

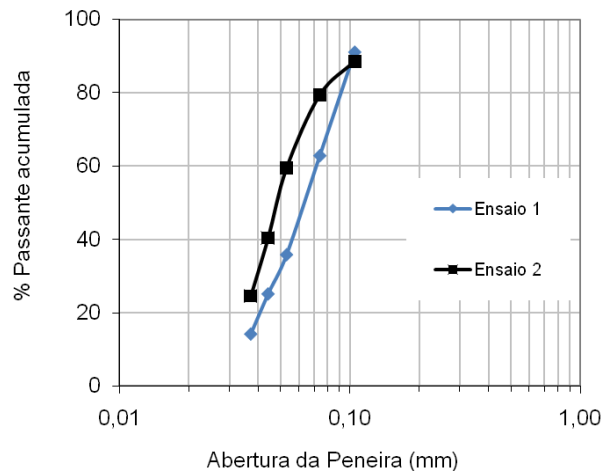


Figura 1. Distribuição de tamanho das amostras

### 3.1.2. Massa específica e teor das amostras

As massas específicas das amostras de minério de ferro utilizadas na flotação em coluna, foram 2,91 e 3,13  $\text{g}/\text{cm}^3$  para os ensaios 1 e 2, correspondendo a teores de ferro de 12,8 e 22,1, respectivamente.

### 3.2. Resultados da flotação em coluna

Foram conduzidas duas corridas experimentais na coluna de flotação instalada no CETEM, descrita anteriormente, utilizando as condições operacionais encontradas na Tabela 1. Nos ensaios foi utilizada uma porcentagem de sólidos de 20% e uma vazão mássica de alimentação de 8,5  $\text{kg}/\text{h}$  de minério. Os resultados são mostrados na Tabela 2 abaixo, onde  $m$  é a massa de amostra coletada,  $R_{\text{mássica}}$  é a recuperação mássica de concentrado e  $R_{\text{M}}$  é a recuperação metalúrgica de ferro no concentrado.

Pode-se observar que no ensaio 1 foram obtidos altos teores de ferro no concentrado (acima de 50%), mesmo partindo de um teor de 13% na alimentação, evidenciando a boa seletividade da coluna de flotação. Porém, a recuperação metalúrgica de ferro foi baixa em função da baixa recuperação mássica no concentrado. No ensaio 2 os teores de ferro foram mais baixos (em torno do dobro alimentado), mas com uma média de recuperação metalúrgica acima de 70%, em que se tratando de apenas uma etapa de flotação (etapa *rougher*) o resultado pode ser considerado muito bom.

Tabela 2. Resultados de teor e recuperação metalúrgica de ferro no concentrado dos ensaios

Ensaio	Amostras	Tempo (min)	Rejeito		Concentrado		R <sub>mássica</sub>	RM
			m (g)	% Fe	m (g)	% Fe		
1	1	15	88,48	5,5	13,5	52,1	13,2	39,1
	2	30	120,5	7,8	16,1	54,7	11,8	49,1
	3	45	133,23	7,8	14,8	50,6	10,0	41,8
2	1	15	64,36	6,1	49,3	45,8	43,4	74,0
	2	30	46,85	5,7	67,5	32,7	59,0	72,5
	3	45	76,85	6,9	49,6	46,9	39,2	76,4

#### 4. Conclusões / Considerações finais

A concentração de minério de ferro por meio de flotação em coluna mostrou-se eficaz, possibilitando a obtenção de um concentrado com teores de ferro acima de 50%, de um máximo de 70% possível, e recuperações metalúrgicas de Fe acima de 70% em apenas uma etapa de flotação, dependendo das condições de alimentação do processo. Para efeito de comparação, utilizando a flotação convencional de bancada, foi obtida uma recuperação metálica de Fe de apenas 40%, nas mesmas condições utilizadas na flotação em coluna. A flotação em coluna comprovou ser um processo muito promissor de beneficiamento mineral para enriquecimento de partículas finas de minério de ferro de baixo teor, devendo ser realizando mais ensaios de flotação para avaliar outras variáveis operacionais da coluna.

#### 5. Agradecimentos

Ao CETEM pela infra-estrutura oferecida para a realização das atividades experimentais e ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica.

#### 6. Referências Bibliográficas

Aquino, J. A., Oliveira, M. L. M., Fernandes, M. D., Flotação em coluna. In: **Tratamento de Minérios** (Luz, A. B., Sampaio, J. A., Almeida, S. L. M., Editores), CETEM/MCT, 4a Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

Canadian Process Technologies Inc., Column Flotation Test Cell – **Operating and Maintenance Manual**, 2007, 32p.

Couto, H. J. B., Recuperação de Finos na Indústria Mineral Utilizando os Processos de Flotação em Coluna e por Ar Dissolvido, CETEM, Relatório Técnico Interno, 2009, 38p.

Finch, J. A., Dobby G. S., Column Flotation, **Pergamon Press**, 1ª edição, 1990.