

|   |            |
|---|------------|
| <b>1 A FLOTAÇÃO COMO OPERAÇÃO UNITÁRIA NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS.....</b> | <b>9</b>   |
| <i>Antônio Eduardo Clark Peres e Armando Corrêa de Araujo</i>             |            |
| 1.1 Aspectos básicos da flotação .....                                    | 10         |
| 1.2 Princípios de propriedades das interfaces .....                       | 13         |
| 1.3 Reagentes e mecanismos de ação .....                                  | 24         |
| 1.4 Máquinas de flotação .....  | 35         |
| 1.5 Aplicações da flotação no Brasil.....                                 | 35         |
| Referências bibliográficas .....  | 39         |
| <b>2 MÁQUINAS DE FLOTAÇÃO.....</b>  | <b>40</b>  |
| <i>Arthur Pinto Chaves e Wendel Johnson Rodrigues</i>                     |            |
| 2.1 Células mecânicas .....   | 42         |
| 2.2 Células-tanque .....  | 48         |
| 2.3 Hidrodinâmica das células de flotação .....                           | 50         |
| 2.4 Células pneumáticas.....  | 55         |
| 2.5 Outros equipamentos .....   | 57         |
| 2.6 Equipamentos disponíveis no Brasil .....                              | 59         |
| Referências bibliográficas .....  | 62         |
| <b>3 FLOTAÇÃO EM COLUNA .....</b>   | <b>65</b>  |
| <i>Lauro Akira Takata e Thiago Valle</i>                                  |            |
| 3.1 Breve histórico .....   | 65         |
| 3.2 O processo de flotação em coluna.....                                 | 67         |
| 3.3 Evolução tecnológica da flotação em coluna.....                       | 79         |
| 3.4 O atual estado da arte.....   | 82         |
| 3.5 O caso da Bunge em Araxá.....   | 86         |
| 3.6 Sistemas de geração de bolhas.....                                    | 91         |
| Referências bibliográficas .....  | 102        |
| <b>4 PAULO ABIB: O GRANDE MESTRE DA FLOTAÇÃO NO BRASIL.....</b>           | <b>105</b> |
| <i>Francisco Evando Alves e Arthur Pinto Chaves</i>                       |            |
| 4.1 Um início nada fácil .....  | 106        |
| 4.2 O desafio da Serrana .....  | 107        |
| 4.3 Trilhando o próprio caminho .....                                     | 111        |
| 4.4 A perda .....   | 113        |
| Bibliografia consultada .....   | 114        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS FOSFÁTICOS.....</b>                                | <b>116</b> |
|          | <i>Luiz Antonio Fonseca de Barros</i>                                      |            |
| 5.1      | Flotabilidade das apatitas .....   | 119        |
| 5.2      | Adsorção de coletores em minérios fosfatados.....                          | 121        |
| 5.3      | Uso de ácidos graxos e seus sais.....                                      | 125        |
| 5.4      | Comprimento e grau de insaturação da<br>cadeia hidrocarbônica .....        | 125        |
| 5.5      | Oxidação das duplas ligações .....   | 126        |
| 5.6      | Área limitante .....   | 127        |
| 5.7      | Solubilidade .....   | 128        |
| 5.8      | Sulfossuccinatos e sulfossuccinamatos .....                                | 129        |
| 5.9      | Agentes modificadores .....  | 131        |
| 5.10     | Química do sistema.....  | 134        |
| 5.11     | Controle de pH.....  | 137        |
| 5.12     | <i>Slimes coating</i> .....  | 139        |
| 5.13     | Flotabilidade dos minerais de ganga.....                                   | 140        |
| 5.14     | Análise crítica de processo de concentração de<br>minérios fosfáticos..... | 147        |
|          | Referências bibliográficas .....   | 154        |
| <br>     |  |            |
| <b>6</b> | <b>FLOTAÇÃO DE OURO .....</b>  | <b>158</b> |
|          | <i>Fernando Antônio Freitas Lins e Marisa Bezerra de Mello Monte</i>       |            |
| 6.1      | Classificação dos minérios de ouro .....                                   | 158        |
| 6.2      | A flotação no processamento de minérios de ouro.....                       | 161        |
| 6.3      | Flotação de ouro.....  | 163        |
| 6.4      | A prática de flotação de minérios auríferos no Brasil .....                | 173        |
| 6.5      | Alguns desafios na flotação de minérios auríferos.....                     | 185        |
|          | Referências bibliográficas .....   | 189        |
| <br>     |  |            |
| <b>7</b> | <b>FLOTAÇÃO DE COBRE NA MINERAÇÃO CARAÍBA .....</b>                        | <b>193</b> |
|          | <i>Frank Edward de Oliveira Rezende</i>                                    |            |
| 7.1      | Características gerais da Mineração Caraíba .....                          | 193        |
| 7.2      | Descrição do processo produtivo.....                                       | 198        |
|          | Referências bibliográficas .....   | 213        |
| <br>     |  |            |
| <b>8</b> | <b>FLOTAÇÃO DE COBRE EM SOSSEGO E SALOBO .....</b>                         | <b>214</b> |
|          | <i>Marco Antônio Nankran Rosa e Wendel Johnson Rodrigues</i>               |            |
| 8.1      | Características gerais da usina do Sossego.....                            | 214        |
| 8.2      | A flotação de cobre do Sossego.....  | 217        |
| 8.3      | Características gerais da usina do Salobo.....                             | 222        |
|          | Referências bibliográficas .....   | 230        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>9</b>  | <b>FLOTAÇÃO DE CHUMBO E ZINCO NA VOTORANTIM METAIS .....</b>   | <b>231</b> |
|           | <i>Alberto Augusto Rebelo Biava e Frank Edward de Oliveira Rezende</i>   |            |
| 9.1       | Unidade Vazante - minérios silicatados de zinco .....  | 233        |
| 9.2       | Unidade Morro Agudo - minério sulfetado de<br>chumbo e zinco .....   | 248        |
|           | Referências bibliográficas .....   | 257        |
| <b>10</b> | <b>FLOTAÇÃO DE NÍQUEL NA VOTORANTIM METAIS .....</b>   | <b>258</b> |
|           | <i>Geraldo Majela Silveira</i>   |            |
| 10.1      | Votorantim Metais Níquel - Unidade Fortaleza de Minas....  | 260        |
|           | Bibliografia consultada .....  | 275        |
| <b>11</b> | <b>FLOTAÇÃO DE CLORETO DE POTÁSSIO (SILVITA) .....</b>   | <b>277</b> |
|           | <i>Laurindo de Salles Leal Filho, Eldon Azevedo Masini e Rogério Luiz Moura</i>  |            |
| 11.1      | Particularidades físico-químicas e tecnológicas<br>da flotação de sais de potássio .....                                     | 278        |
| 11.2      | Fundamentos da seletividade da separação silvita (KCl)<br>versus halita (NaCl) por flotação .....                            | 280        |
| 11.3      | O processo de concentração de silvita na usina de<br>concentração de Taquari-Vassouras .....                                 | 282        |
|           | Referências bibliográficas .....   | 287        |
| <b>12</b> | <b>FLOTAÇÃO DE SILICATOS .....</b>   | <b>288</b> |
|           | <i>Paulo Roberto de Magalhães Viana, Armando Corrêa de Araujo e<br/>Antônio Eduardo Clark Peres</i>                          |            |
| 12.1      | Minerais da classe dos silicatos .....   | 288        |
| 12.2      | Estrutura e carga superficial dos silicatos.....   | 299        |
| 12.3      | Química dos reagentes em solução .....   | 306        |
| 12.4      | Adsorção de reagentes .....  | 316        |
| 12.5      | Exemplo de aplicação: flotação de espodumênio<br>em sistemas com feldspato e quartzo.....                                    | 344        |
|           | Referências bibliográficas .....   | 348        |
| <b>13</b> | <b>FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO .....</b>   | <b>354</b> |
|           | <i>Armando Corrêa de Araujo, Antônio Eduardo Clark Peres, Paulo Roberto de<br/>Magalhães Viana e José Farias de Oliveira</i> |            |
| 13.1      | Deslamagem .....   | 357        |
| 13.2      | Coletores catiônicos .....   | 358        |
| 13.3      | Coletores aniônicos .....  | 359        |
| 13.4      | Depressores .....  | 360        |
| 13.5      | Espumantes .....   | 364        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 13.6      | Surfatantes não iônicos .....   | 364        |
| 13.7      | Conclusões .....  | 365        |
|           | Referências bibliográficas .....  | 366        |
| <b>14</b> | <b>FLOTAÇÃO DE FELDSPATOS .....</b>   | <b>368</b> |
|           | <i>Carlos Alberto Ikeda Oba e Luiz Paulo Barbosa Ribeiro</i>                          |            |
| 14.1      | Os feldspatos .....   | 368        |
| 14.2      | Características da flotação de feldspatos .....                                       | 372        |
| 14.3      | Beneficiamento de feldspatos.....   | 375        |
| 14.4      | Cuidados na eliminação de efluentes com flúor.....                                    | 383        |
|           | Referências bibliográficas .....  | 385        |
| <b>15</b> | <b>FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS DE MAGNESITA E TALCO .....</b>                                | <b>386</b> |
|           | <i>Paulo Roberto Gomes Brandão e Arnaldo Lentini da Câmara</i>                        |            |
| 15.1      | Magnesita .....   | 386        |
| 15.2      | Talco .....   | 395        |
| 15.3      | Conclusões.....   | 399        |
|           | Referências bibliográficas .....  | 400        |
| <b>16</b> | <b>FLOTAÇÃO DE BAUXITA .....</b>  | <b>402</b> |
|           | <i>Arthur Pinto Chaves</i>  |            |
| 16.1      | Histórico do desenvolvimento de processo.....   | 403        |
| 16.2      | Revisão da literatura .....   | 405        |
| 16.3      | Conclusão.....  | 413        |
|           | Referências bibliográficas .....  | 415        |
| <b>17</b> | <b>FLOTAÇÃO DO CARVÃO.....</b>  | <b>417</b> |
|           | <i>Carlyle Torres Bezerra de Menezes, André Taboada Escobar e Arthur Pinto Chaves</i> |            |
| 17.1      | Breve histórico do processo de flotação de carvão no Brasil .....                     | 417        |
| 17.2      | Mecanismos atuantes na flotação de carvão .....                                       | 420        |
| 17.3      | Equipamentos utilizados na flotação de carvão .....                                   | 423        |
| 17.4      | Reagentes utilizados na flotação .....  | 424        |
| 17.5      | Desafios e problemas operacionais na flotação de carvão...                            | 424        |
| 17.6      | Considerações finais.....   | 425        |
|           | Referências bibliográficas .....  | 426        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>18 O PROCESSO DE CONDICIONAMENTO EM ALTA</b>   |            |
| <b>INTENSIDADE (CAI) NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS.....</b>   | <b>428</b> |
| <i>Jorge Rubio</i>  |            |
| 18.1 A problemática da recuperação de finos de minérios .....   | 428        |
| 18.2 Condicionamento em alta intensidade (CAI) .....  | 430        |
| 18.3 Processo CAI-flotação: estudos de pesquisa em<br>escala de laboratório.....                        | 437        |
| 18.4 Estudo de caso: minérios de fosfato da Bunge<br>Araxá (atual Vale) .....                           | 439        |
| 18.5 Considerações finais e conclusões.....   | 445        |
| Referências bibliográficas .....  | 447        |
| <br>  |            |
| <b>19 TRATAMENTO DE ÁGUA NA MINERAÇÃO.....</b>  | <b>450</b> |
| <i>Magno Meliauskas</i>   |            |
| 19.1 Hidrologia e Hidrogeologia .....   | 451        |
| 19.2 Tratamento de águas de lavra e do<br>processamento mineral.....                                    | 454        |
| 19.3 Considerações finais e conclusões.....   | 458        |
| Referências bibliográficas .....  | 458        |
| <br>  |            |
| <b>20 PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM FLOTAÇÃO.....</b>   | <b>459</b> |
| <i>Armando Corrêa de Araujo, Paulo Roberto de Magalhães Viana e<br/>    Antônio Eduardo Clark Peres</i> |            |
| 20.1 Etapas de pesquisa e desenvolvimento no<br>processo de flotação .....                              | 462        |
| 20.2 Onde as pesquisas em flotação são desenvolvidas? .....   | 466        |
| 20.3 Características importantes no desenvolvimento<br>de pesquisas em flotação .....                   | 470        |
| 20.4 Tendências para o futuro .....   | 471        |
| Referências bibliográficas .....  | 472        |
| <br>  |            |
| <b>21 A CLARIANT NA MINERAÇÃO .....</b>   | <b>475</b> |
| <i>Equipe Clariant</i>  |            |
| 21.1 Coletores .....  | 475        |
| 21.2 Espumantes .....   | 484        |
| <br>  |            |
| <b>22 QUEM É QUEM NA FLOTAÇÃO NO BRASIL.....</b>  | <b>489</b> |

# A flotação como operação unitária no Tratamento de Minérios

# 1

Antônio Eduardo Clark Peres  
Armando Corrêa de Araujo

O papel da flotação como operação unitária no Tratamento de Minérios fica bem caracterizado com o auxílio dos Quadros 1.1 e 1.2.

No Quadro 1.1, apresenta-se um panorama da Engenharia Mineral, entendida como o conjunto de atividades que tem como matéria-prima o minério e como objetivo a produção de bens comercializáveis, os chamados concentrados. A concentração é uma etapa do setor de Tratamento de Minérios.

**Quadro 1.1 PANORAMA DA ENGENHARIA MINERAL**

| Setor                  | Etapa  |
|------------------------|--|
| Pesquisa mineral       | prospecção; exploração                                       |
| Mineração ou lavra     | desenvolvimento; lavra ou exploração                         |
|                        | preparação: fragmentação ou cominuição: britagem moagem      |
|                        | controle de tamanho: peneiramento classificação concentração |
| Tratamento de Minérios | acabamento do concentrado: espessamento filtração secagem    |
|                        | descarte do rejeito: aglomeração espessamento estocagem      |
|                        | Manuseio, transporte e comercialização                       |
| Metalurgia Extrativa   | hidrometalurgia; pirometalurgia                              |
|                        | Amostragem, circulação de água, controle                     |

A concentração de minerais requer três condições básicas: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica (Silva, 1973). A liberação dos grãos dos diferentes minerais é obtida por meio de operações de fragmentação (britagem e moagem) intercaladas com etapas de separação por tamanho. A separabilidade dinâmica está diretamente ligada aos equipamentos empregados. As máquinas de flotação caracterizam-se por possuírem mecanismos capazes de manter as partículas em suspensão e de possibilitar a aeração da polpa. A diferenciabilidade é a base da seletividade do método.

As propriedades diferenciadoras e os métodos de concentração a elas relacionados são apresentados no Quadro 1.2.

## 1.1 Aspectos básicos da flotação

Flotação em espuma, ou simplesmente flotação, é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que

**Quadro 1.2** PROPRIEDADES DIFERENCIADORAS E MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO

| Propriedades                        | Métodos  |
|-------------------------------------|--|
| Óticas (cor, brilho, fluorescência) | escolha ótica (manual ou automática)   |
| Densidade                           | líquido denso, meio denso, jigues, mesas, espirais, cones, ciclones de meio denso, DWP, bateias, calhas, calhas estranguladas, classificadores, hidrosseparadores etc. |
| Forma                               | os mesmos métodos baseados na densidade  |
| Suscetibilidade magnética           | separação magnética  |
| Condutividade elétrica              | separação eletrostática ou de alta tensão  |
| Radioatividade                      | escolha com contador   |
| Textura/friabilidade                | cominuição seguida de classificação ou hidrosseparação ou peneiramento   |
| Reatividade química                 | hidrometalurgia  |
| Reatividade de superfície           | flotação, agregação ou dispersão seletiva, eletroforese, aglomeração esférica  |

Quadro 1.4 SUMÁRIO DAS USINAS DE FLOTAÇÃO EM OPERAÇÃO NO BRASIL

| Mineral          | Operador            | Usina/mina                 | Máquinas mecânicas? | Coluna? | Colunas substituíram máquinas mecânicas? | Classe de coletor  | Princípios modificadores                               | Faixa de pH | Alimentação da flotação tph |
|------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|---------|--|--------------------|--|-------------|-----------------------------|
| fosfato          | Bunge Fertilizantes | Cajati                     | sim                 | sim     | não                                      | sarcosinato        | amido  | alcalino    | 1.000                       |
|                  |                     | Araxá                      | não                 | sim     | sim                                      | ácidos graxos      | amido  | alcalino    | 1.500                       |
| fosfato          | Fosfertil           | Tapira                     | não                 | sim     | sim                                      | ácidos graxos      | amido  | alcalino    | 1.500                       |
|                  |                     | Catalão                    | sim                 | sim     | sim                                      | ácidos graxos      | amido  | alcalino    | 1.000                       |
| Copebras         | Catalão             | sim                        | sim                 | não     | não                                      | ácidos graxos      | amido  | alcalino    | 800                         |
|                  |                     | Pico                       | não                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 700                         |
| MBR              | Vargem Grande       | não                        | não                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 500                         |
|                  |                     | Germano                    | sim                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 3.200                       |
| minério de ferro | CSN                 | Casa de Pedra              | não                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 800                         |
|                  |                     | Cauê                       | sim                 | não     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 1.600                       |
|                  |                     | Conceição                  | sim                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 1.800                       |
| CVRD             | Alegria             | sim                        | sim                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 800                         |
|                  |                     | Timbopeba                  | sim                 | não     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    |                             |
|                  |                     | Timbopeba-Capanema         | sim                 | sim     | não                                      | eteramina          | amido  | alcalino    | 600                         |
| zincos           | CMM <sup>(1)</sup>  | Vazante                    | sim                 | sim     | não                                      | amina              | Na <sub>2</sub> S                                      | alcalino    | 80                          |
|                  |                     | Morro Agudo <sup>(3)</sup> | sim                 | não     | não                                      | tio <sup>(4)</sup> | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /<br>CuSO <sub>4</sub> | alcalino    | 120                         |



# 2

## Máquinas de flotação

Arthur Pinto Chaves

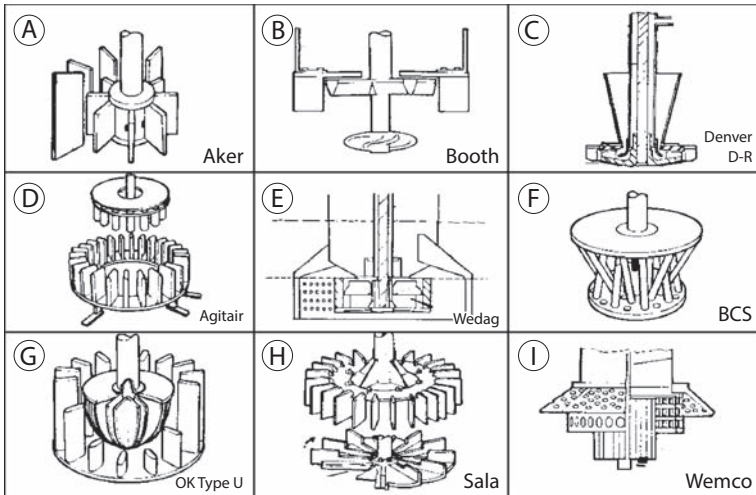
Wendel Johnson Rodrigues

Como ficou bem claro no capítulo anterior, a disponibilidade de um equipamento confiável é condição básica para o bom desempenho da operação unitária de flotação. Isso significa desempenho metalúrgico (capacidade de processo) e capacidade volumétrica para receber, transportar e distribuir os fluxos de alimentação, flotado e deprimido, água e ar que atravessam o equipamento a cada instante.

As primeiras células utilizadas foram células pneumáticas, que ainda hoje são utilizadas em casos específicos. A maior parte dos equipamentos, porém, são células mecânicas subaeradas (com injeção ou não de ar ou outro gás), aqui incluídas as células de grande volume (*tank cells*). Existem também equipamentos que operam com ar disperso ou ar dissolvido. As colunas de flotação começaram a ser empregadas no fim do século XX e hoje constituem uma tendência irreversível. O Brasil é um dos países com maior número de unidades instaladas (ver Quadro 1.4).

Além da flotação propriamente dita, outras operações auxiliares estão envolvidas, a saber:

- ◆ o condicionamento;
- ◆ a dosagem e a adição de reagentes;
- ◆ o adensamento das polpas para permitir o condicionamento;
- ◆ a atrição (*scrubbing*) das superfícies das partículas para remover coberturas de argilas ou óxidos;
- ◆ a deslamagem para eliminar finos e argilominerais nocivos ao processo;
- ◆ o transporte das polpas e espumas;
- ◆ a instrumentação e o controle automático do processo.



**Fig. 2.7** Desenhos de rotor-estator

Fonte: Young (1982).

fornecer agitação muito eficiente para o contato entre os reagentes – no caso da flotação, o que se deseja é o contato partícula-bolha de ar. Verificou-se que as forças intensas de cisalhamento criadas pelo rotor são capazes de fornecer a energia necessária para a ruptura da barreira constituída pelo filme de água da bolha e permitir melhor adesão bolha/partícula, mesmo para as partículas de pequena dimensão.

O efeito indesejável da rotação da polpa dentro da célula foi resolvido mediante a instalação de defletores adequadamente projetados para impedir o movimento rotacional, dirigir os fluxos ascendentes e descendentes dentro da célula e maximizar a recirculação da polpa na região inferior, ao mesmo tempo que a turbulência na região superior precisa ser reduzida para diminuir o descolamento bolha-partícula coletada.

As calhas de recolhimento da espuma são radiais.

O projeto das máquinas modernas dá muita atenção aos aspectos hidrodinâmicos da polpa dentro da célula. Existe a preocupação tanto com a transferência de ar à polpa como com a circulação da polpa dentro da célula e a transferência da

## 3.1 Breve histórico

A concepção do processo de flotação em coluna teve início em 1961, a partir da invenção patenteada pelos canadenses Remy Trembly e Pierre Boutin. As primeiras descrições do equipamento e ensaios em escala-piloto foram feitos por Boutin e Wheeler em meados da década de 1960. Em 1981, a Mines Gaspé Division, da Noranda Mines, iniciou, na província de Quebec, no Canadá, a operação da primeira célula de coluna em escala industrial, com 0,91 m de diâmetro, para flotação *cleaner* de molibdênio. A versão final desse circuito, em 1987, era um estágio com coluna de 0,91 m de diâmetro, seguida por flotação em outra coluna de 0,46 m de diâmetro. A partir de então, as colunas industriais de flotação espalharam-se rapidamente pelo Canadá, Austrália, África do Sul e América do Sul, principalmente Chile e Brasil.

No Brasil, as primeiras colunas de flotação de grande porte entraram em operação em 1991, na Mina do Germano (Mariana, MG), da Samarco Mineração, com colunas de 3,66 m e 2,44 m de diâmetro para flotação do quartzo de minério de ferro (Fig. 3.1). Posteriormente, outras empresas do setor instalaram colunas industriais de grandes dimensões com o mesmo objetivo, ou seja, a concentração de minério de ferro pela flotação reversa de quartzo. Atualmente, apenas no segmento de tratamento de minério de ferro, existem no país 68 colunas industriais em operação, instaladas nas seguintes empresas:

- ◆ Samarco Mineração S.A. Mina do Germano (Mariana, MG);

# Paulo Abib: o grande mestre da flotação no Brasil

# 4

*Francisco Evando Alves  
Arthur Pinto Chaves*

O desenvolvimento das técnicas de flotação e da própria Engenharia Mineral no Brasil está indissociavelmente ligado à figura do professor Paulo Abib Andery, um pioneiro e, como é próprio dos pioneiros, um visionário. Foi ele que, com uma equipe de jovens engenheiros, seus alunos do então Departamento de Engenharia de Minas e Metalurgia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP), desenvolveu pioneiramente a flotação do fosfato da jazida de Jacupiranga (SP), viabilizando o aproveitamento das reservas brasileiras de baixo teor, então pertencentes à Serrana de Mineração, uma subsidiária do grupo Bunge. O processo foi desenvolvido na década de 1960 e até hoje Jacupiranga encontra-se em produção.

Além de possibilitar a concentração do fosfato de baixo teor, Paulo Abib e sua equipe desenvolveram o processo para o aproveitamento das imensas reservas de calcário, que estava associado ao fosfato e era, até então, considerado como rejeito. O calcário passou a ser utilizado para a fabricação de cimento numa fábrica ao lado da mina.

O desenvolvimento do processo que permitiu o aproveitamento da rocha carbonatítica de Jacupiranga já seria suficiente para que o professor Paulo Abib figurasse na galeria dos grandes nomes da mineração brasileira. No entanto, ele fez muito mais: foi um grande professor, com alunos de graduação e pós-graduação por todo o país, e criou uma empresa que foi pioneira no estudo e desenvolvimento de processos minerais no Brasil e que é tida, até hoje, como a principal empresa de Engenharia Mineral do país. Nessa empresa, toda uma geração de engenheiros de minas e tratamentistas foi formada e

# 5

## Flotação de minérios fosfáticos

*Luiz Antonio Fonseca de Barros*

Para haver a separação das apatitas dos minerais de ganga, dos minérios fosfáticos de origem ígnea, há que se mudar o caráter da sua superfície, o que, habitualmente, se faz no processo de concentração via flotação por espumas, em meio aniônico, com o uso de ácidos carboxílicos com diferentes tamanhos de cadeia carbônica e grau de saturação. Esses ácidos adsorvem na superfície da apatita por meio do processo de quimissorção, ou seja, há precipitação, na superfície dessa apatita, de um sal do ácido carboxílico utilizado.

Trabalhos técnicos demonstraram esse fenômeno, como, por exemplo, o de Rao, Antti e Forssberg (1990), que avaliaram a adsorção de camada de oleato de sódio sobre o sítio de cálcio da superfície dos minerais semissolúveis (calcita, apatita e fluorita), forçando com a precipitação de oleato de cálcio mediante a concentração excessiva de oleato de sódio nesses ensaios. Mishra, Chander e Fuerstenau (1980) observaram que a mobilidade eletroforética da apatita tornou-se negativa, com mudanças do ponto isoelétrico dessa apatita à medida que se aumenta a concentração de oleato de sódio em solução.

No caso das apatitas provenientes de rochas ígneas, que correspondem à grande maioria dos minérios fosfáticos brasileiros, o desenvolvimento de reagentes químicos capazes de separar o mineral apatita a partir de um minério com diferentes minerais de ganga, principalmente de minerais carbonáticos, foi o grande marco do desenvolvimento da tecnologia mineral no Brasil, na década de 1960. Nesse período, o professor Paulo Abib Andery desenvolveu, para a chaminé alcalina carbonatítica de Cajati (SP), o processo de

concentração de apatita a partir do uso de ácido graxo como coletor de apatita e de amido de milho como depressor dos minerais de ganga (Leal Filho, 2000). Estava iniciado, assim, em caráter inédito, o desenvolvimento de processo para o aproveitamento dos minérios fosfáticos brasileiros de baixo teor de fósforo.

Desde essa época, diversos pesquisadores têm se dedicado à pesquisa de desenvolvimento de reagentes de processo, pois os minérios fosfáticos passaram a apresentar problemas muito particulares, em razão da sua complexidade mineralógica. Enquanto o minério fosfático de Cajati, de composição relativamente simples, responde razoavelmente ao processo desenvolvido pelo professor Paulo Abib, os minérios das chaminés alcalinas de Tapira (MG) e de Catalão (GO) apresentaram problemas outros e bastante complexos, decorrentes, principalmente, das suas diversificadas composições mineralógicas (Leal Filho, 2002). Além disso, eles apresentam uma grande variedade de espécies minerais na sua composição, e alguns minerais de ganga mostram propriedades superficiais bastante similares às da apatita. Esses minerais possuem substituições e modificações químicas e cristalográficas que alteram suas características físicas e químicas e, como consequência, suas propriedades superficiais, respondendo diferentemente às variáveis de processo e às características dos ácidos carboxílicos utilizados (Barros, 1997).

Lenharo (1994), em seu estudo de caracterização de diferentes apatitas brasileiras, avaliou a flotabilidade das diversas apatitas dos diferentes depósitos nacionais em tubo de Hallimond, usando como coletor o reagente tradicional ácido graxo de *tall oil*, derivado da madeira *Pinus elliottii*, e verificou que as apatitas primárias apresentam melhor desempenho na flotação em comparação com as apatitas secundárias. Estas tiveram um desempenho inferior devido à associação com óxido-hidróxido de ferro em suas superfícies. Portanto, a autora concluiu que, de modo geral, o nível de flotabilidade está relacionado às variações composicionais e morfológicas, bem como ao grau de impregnação e intercrescimento com óxidos-hidróxidos de ferro.

*Fernando Antônio Freitas Lins  
Marisa Bezerra de Mello Monte*

## **6.1 Classificação dos minérios de ouro**

Em 2007, o Brasil produziu 49,6 t de ouro (2% da produção mundial), sendo 44,4 t originadas de empresas (89,5%) e 5,2 t (10,5%), de garimpos. Três importantes produtores de ouro utilizam a flotação em seus processos: a AngloGold Ashanti Mineração, a São Bento Mineração (adquirida em agosto de 2008 pela primeira) e a Rio Paracatu Mineração (RPM), todas no Estado de Minas Gerais. Em conjunto, elas produziram cerca de 15 t em 2007 (a São Bento, paralisada para manutenção, não operou nesse ano).

Estima-se que aproximadamente 30% da produção industrial de ouro no Brasil se origine do tratamento de minérios auríferos via espumas da flotação, evidenciando a relevância desse processo centenário (cinquentenário no Brasil) para o segmento do ouro. Outra parte da produção de ouro no país, associada a concentrados de flotação, provém de usinas que concentram sulfetos de cobre por flotação, como a Vale (mina do Sossego, no Pará) e a Yamana (Chapada, em Goiás), mas elas não serão abordadas neste capítulo.

Na primeira edição deste livro, chamava-se a atenção para o fato de que a elevação da cotação internacional do ouro acima do patamar de US\$ 400,00/oz havia promovido, no Brasil, um interesse renovado na expansão das operações existentes, a reativação de minas e a implantação de novas unidades produtivas. Na revisão deste capítulo, feita em novembro de 2008, a cotação oscilava em torno dos US\$ 800,00/oz, após ter atingido US\$ 1.000,00/oz no início daquele ano. O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) estimou, antes da crise financeira internacional de outubro

# Flotação de cobre na mineração Caraíba

# 7

Frank Edward de Oliveira Rezende

## 7.1 Características gerais da Mineração Caraíba

A Mineração Caraíba S.A. (MCSA) lava e beneficia minério de cobre no município de Jaguarari (BA) (ver localização na Fig. 7.1). O projeto Caraíba foi projetado e montado entre 1976 e 1980, e a produção de concentrado começou em dezembro de 1980. Na época, a então Caraíba Metais S.A. era uma empresa estatal e suas atividades produtivas incluíam mina e metalurgia. A metalurgia foi privatizada em 1988 e a mina, em 1994, mas o relacionamento comercial entre as empresas continua, pois o concentrado de cobre produzido na MCSA é, via de regra, vendido para a atual Caraíba Metais S.A., que tem sua planta metalúrgica localizada em Camaçari, próximo à capital Salvador.



Fig. 7.1 Mapa de localização da mina Caraíba



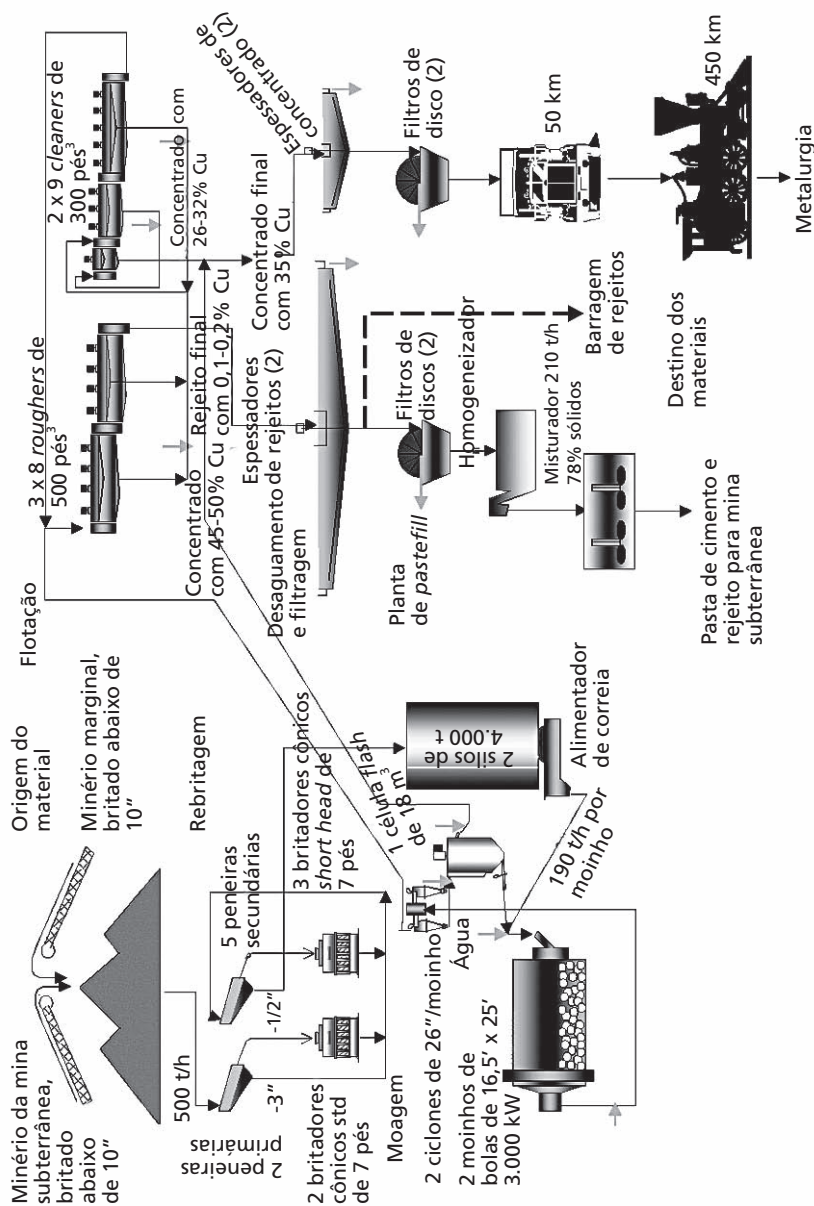


Fig. 7.2 Processo produtivo da MCSA



# Flotação de cobre em Sossego e Salobo

*Marco Antônio Nankran Rosa  
Wendel Johnson Rodrigues*

## **8.1 Características gerais da usina do Sossego**

A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) realizou seu primeiro embarque de concentrado de cobre em junho de 2004, completando, assim, o início do ciclo de produção da mina do Sossego e abrangendo também o minério de cobre como um de seus produtos de exportação.

A usina do Sossego está localizada na região denominada Sossego, a cerca de 37 km do município de Canaã dos Carajás, no Estado do Pará. O Sossego tem dois depósitos principais: Sequeirinho e Morro do Sossego, que estão situados na porção sul de Carajás, ao longo de uma estrutura de cisalhamento regional. O depósito do Sequeirinho consiste de uma única zona mineralizada contínua, de aproximadamente 2.000 m ao longo de sua direção, com mineralização adicional, de menor teor, estendendo-se por mais de 1.000 m em direção oeste. Por sua vez, o Morro do Sossego é parte de uma grande estrutura circular com cerca de 600 m de diâmetro.

O minério de cobre é basicamente calcopirítico, com pequena presença de bornita e calcocita, e a ganga compreende silicatos e magnetita, além de óxidos e carbonatos em quantidades menores. A mineralização com maiores teores de cobre é encontrada preferencialmente na zona brechada, além de sua disseminação, principalmente em granitos, gabros, biotitaxisto, metavulcânica ácida, actinolititos e magnetitos. As composições mineralógica e química médias do minério sulfetado processado na usina do Sossego são apresentadas nas Tabs. 8.1 e 8.2, respectivamente.

A lavra do minério de cobre, tanto no Sequeirinho como no Sossego, é realizada a céu aberto, com desmonte feito por explo-

# Flotação de chumbo e zinco na Votorantim Metais

# 9

*Alberto Augusto Rebelo Biava  
Frank Edward de Oliveira Rezende*

Em 2004, a Votorantim Metais Zinco S.A. (VM-Zn) passou a ser a quinta maior produtora mundial de zinco. Possui e opera duas minas no Brasil (ver localização na Fig. 9.1), no Estado de Minas Gerais (Cia. Mineira de Metais - Unidade Vazante, em Vazante, e Unidade Morro Agudo, em Paracatu), e três usinas metalúrgicas, sendo duas no Brasil, em Minas Gerais (Cia. Mineira de Metais - Unidade Três Marias, em Três Marias, e Unidade Juiz de Fora, em Juiz de Fora), e uma no Peru (Unidade Cajamarquilla, em Lima).

Os primeiros embarques de concentrados produzidos por flotação ocorreram em 1984 (Vazante) e 1988 (Morro Agudo). Enquanto em Vazante são produzidos concentrados de calamina e willemita (silicatos de zinco), em Morro Agudo produzem-se concentrados de galena (sulfeto de chumbo) e de esfalerita (sulfeto de zinco).

Os concentrados de zinco das duas minas são tratados na usina de Três Marias (na Fig. 9.1, Três Marias está localizada entre as minas e Belo Horizonte), e o concentrado de chumbo é exportado. A usina de Juiz de Fora trata concentrados de zinco sulfetado importados.

Os concentrados produzidos localmente passam por tratamentos distintos antes do processamento metalúrgico:

- ◆ cerca de 70% do concentrado silicatado é calcinado em forno rotativo;
- ◆ o concentrado sulfetado de zinco de Morro Agudo é pré-lixiviado com ácido sulfúrico e a polpa resultante é tratada para reflotar os sulfetos e eliminar as impurezas precipitadas.

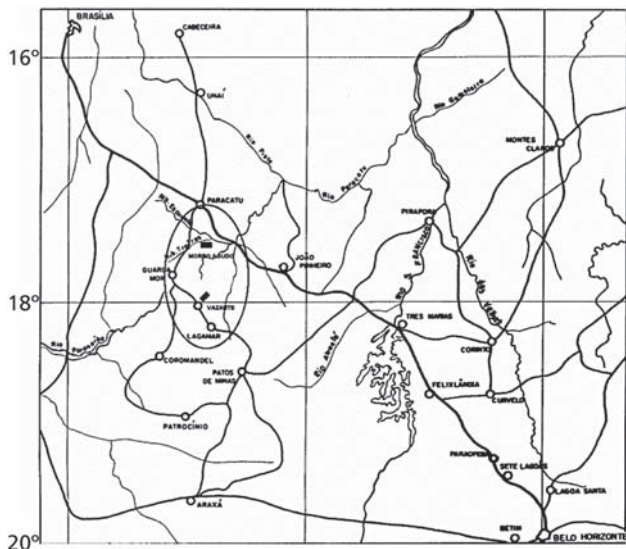


Fig. 9.1 Localização das minas da VM-Zn

O diagrama de blocos da Fig. 9.2 ilustra o fluxo de materiais entre as várias unidades da VM-Zn.

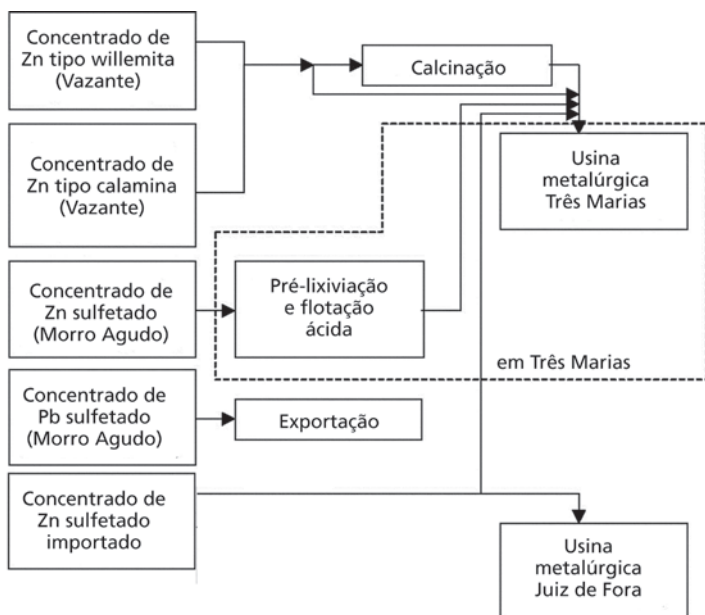


Fig. 9.2 Fluxo de materiais entre as unidades da VM-Zn

# 10

## Flotação de níquel na Votorantim Metais

Geraldo Majela Silveira

O níquel é um importante metal que ocupa a vigésima posição entre os elementos abundantes na crosta terrestre, sendo utilizado em pelo menos 300 mil produtos para consumo, abrangendo vários segmentos da indústria, tanto na forma pura como na forma de liga com outros metais. Mais de 65% do níquel produzido é utilizado em ligas com ferro e aço; cerca de 15% é utilizado na produção, juntamente com cobre, de ligas resistentes à corrosão, e, juntamente com cromo, de ligas resistentes a altas temperaturas; cerca de 5% são utilizados em outros tipos de ligas com outros metais; 10% são utilizados na galvanoplastia; e 5% são utilizados em baterias, como catalisadores, ímãs e em cerâmicas.

Duas classes de materiais contendo níquel podem ser definidas:

- a) Classe 1: derivados de alta pureza, com no mínimo 99% de níquel contido, representados basicamente pelo níquel eletrolítico, com 99,9% de pureza, e pelo *carbonyl pellets*, com 99,7%;
- b) Classe 2: derivados com conteúdo entre 20% e 96%, representados basicamente pelas ligas de Fe-Ni, mates, óxidos e sinter de níquel, bastante utilizados na fabricação do aço inox e de ligas com aço.

Primariamente, o níquel pode ser obtido por meio da lavra tanto de minérios sulfetados como de minérios lateríticos, também conhecidos como minérios oxidados. Em geral, os minérios sulfetados são procedentes de rochas sãs e não superficiais, e geram cerca de 55% da produção mundial de níquel. Os minérios lateríticos, em função da sua gênese, apresentam-se mais superficialmente e são responsáveis pelo restante da produção de níquel.

# Flotação de cloreto de potássio (silvita)

# 11

*Laurindo de Salles Leal Filho  
Eldon Azevedo Masini  
Rogério Luiz Moura*

Além do fósforo e do nitrogênio, o potássio também é um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, razão pela qual constitui matéria-prima indispensável na composição de fertilizantes. Apesar de ser um elemento abundante na crosta terrestre e de grande distribuição entre os minerais da família dos silicatos (como ortoclásio, moscovita e flogopita), para que seja aplicado na formulação de fertilizantes o potássio é procurado na forma de sais solúveis, tais como os minerais silvita (KCl) e carnalita ( $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Tais minerais são encontrados em rochas denominadas evaporitos marinhos, onde a halita (NaCl) constitui o principal mineral de ganga. Outros minerais de potássio presentes em evaporitos marinhos são: kainita ( $\text{KCl}\cdot\text{MgSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), langbeinita ( $\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{MgSO}_4$ ), polialita ( $\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{MgSO}_4\cdot 2\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e leonita ( $\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{MgSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). O nome silvinita é utilizado para denominar um tipo de minério de potássio predominantemente constituído por silvita (KCl) e halita (NaCl) (Skinner, 1996).

Atualmente, cerca de 75% do cloreto de potássio produzido em todo o mundo é oriundo da concentração por flotação (Titkov, 2004), e os 25% restantes são oriundos da precipitação seletiva a partir de salmouras.

No Brasil, as reservas de sais de potássio encontram-se em Sergipe e no Amazonas. No município de Rosário do Catete (SE), desde 1985 funciona o complexo industrial de Taquari-Vassouras, composto de mina subterrânea e usina de concentração de silvita, além de unidades de secagem e compactação do concen-

# 12

## Flotação de silicatos

*Paulo Roberto de Magalhães Viana*

*Armando Corrêa de Araujo*

*Antônio Eduardo Clark Peres*

A flotação de silicatos representa, sem dúvida, um dos mais vastos campos abertos para pesquisa e desenvolvimento em flotação, por diversos fatores. Entre estes, destacam-se a complexidade das separações por vezes necessárias, como, por exemplo, a separação entre dois minerais muito similares, como os feldspatos albita e microclina, e a enorme diversidade dos minerais pertencentes à classe dos silicatos. Além disso, por serem os minerais mais abundantes da crosta terrestre, a variedade composicional dos silicatos adiciona um fator a mais aos desafios relacionados à aplicação da flotação a esses minerais.

Entre os diversos recursos minerais direta ou indiretamente associados aos silicatos, destacam-se rochas da classe geral dos pegmatitos, incluídas nessa categoria outras rochas de composição similar, como os alaskitos.

### **12.1 Minerais da classe dos silicatos**

Oito elementos químicos respondem por mais de 98% da composição da crosta terrestre: oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, cálcio, sódio e potássio. Destes, somente o oxigênio e o silício são responsáveis por cerca de 70% da massa da crosta. Isso explica por que os minerais que contêm silício e oxigênio, denominados silicatos, são os mais abundantes na crosta terrestre. A estrutura cristalina dos silicatos e a sua influência nas propriedades de superfície desses minerais serão brevemente revistas neste capítulo. Uma descrição mais detalhada da estrutura dos silicatos pode ser encontrada em Klein (2002).

# 13

## Flotação de minérios de ferro

*Armando Corrêa de Araujo  
Antônio Eduardo Clark Peres  
Paulo Roberto de Magalhães Viana  
José Farias de Oliveira*

O quartzo é o principal mineral de ganga presente em minérios de ferro. A flotação é o método de concentração mais largamente adotado para a faixa granulométrica fina ( $< 150 \mu\text{m}$ ). Existem diferentes rotas de flotação quando o mineral de ganga é o quartzo:

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

A maior parte dessa pesquisa ocorreu nos Estados Unidos durante as décadas de 1930 e 1940. A Hanna Mining, em associação com a Cyanamid, desenvolveu as duas rotas de flotação aniônica, tendo sido a última delas empregada industrialmente durante os anos 1950 em Michigan e Minnesota. Concomitantemente, a agência do United States Bureau of Mines (USBM) em Minnesota desenvolveu a rota de flotação catiônica reversa, que veio a se tornar a técnica mais viável para a flotação de minérios de ferro nos Estados Unidos e em outros países ocidentais. As primeiras aplicações da flotação catiônica reversa empregavam aminas graxas, posteriormente substituídas pelas mais eficientes eteraminas.

A rota de flotação catiônica reversa é, de longe, o método mais utilizado. O quartzo é flotado com eteraminas ( $\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3\text{-NH}_2$ ) parcialmente neutralizadas com ácido acético. O grau de neutralização é um parâmetro importante. Graus maiores de neutralização aumentam a solubilidade, mas prejudicam o desempenho na flotação. A maioria das eteraminas é atualmente fornecida com graus de neutralização na faixa entre 25% e 30%. O desempenho



na flotação de certos minérios de ferro é favorecido com o uso de eterdiaminas em combinação com etermonoaminas. Eventualmente, a amina tem sido parcialmente substituída por óleo diesel em alguns concentradores.

A emulsificação do óleo diesel exerce um papel relevante no processo. O preço do óleo diesel é inferior ao da amina, e não foi detectado impacto ambiental significativo.

A amina exerce também o papel de espumante na flotação de minérios de ferro. Como os espumantes custam menos que as aminas, a possibilidade da substituição parcial de aminas por espumantes convencionais tem sido investigada.

Os minerais de ferro são deprimidos por amidos não modificados. Amidos de milho são, de longe, as espécies mais empregadas, em razão de sua elevada disponibilidade. Todos os tipos de amidos não modificados de elevado peso molecular precisam ser solubilizados em um processo conhecido como gelatinização, que pode ser efetuado pela adição de água quente ou, de modo mais prático, pela adição de NaOH. A composição de amidos de milho varia de quase 100% amilopectina + amilose, base seca, até produtos contendo impurezas como óleo e proteínas. A proteína mais abundante no milho, a zeína, tem ação depressora sobre a hematita. Altos teores de óleo inibem a espuma.

Amidos estão presentes em outras espécies vegetais. A espécie mais atrativa em termos de custos de produção é a mandioca, cujo cultivo não requer cuidados especiais. A falta de grandes produtores, no entanto, é um empecilho ao seu uso. Ela apresenta baixo teor de óleo e suas gomas exibem viscosidades superiores às dos amidos de milho, um indicativo de maior peso molecular e ação depressora mais efetiva.

A flotação aniônica direta de óxidos de ferro parece ser uma rota atraente para a concentração de minérios de baixo teor e material estocado em bacias de rejeito. Ácidos graxos podem ser usados como coletores, mas a depressão de quartzo ainda é um desafio a ser vencido.

# 14

## Flotação de feldspatos

Carlos Alberto Ikeda Oba

Luiz Paulo Barbosa Ribeiro

A flotação de feldspatos no Brasil, principalmente nas regiões sul e sudeste, tem sido estudada como alternativa para a produção de concentrados de melhor qualidade a partir de rochas da região, uma vez que o custo de transporte tem encarecido muito o feldspato originário da região nordeste do país.

Informações não publicadas, geradas a partir de estudos recentemente realizados, indicam a viabilidade técnica de empreendimentos para a obtenção de concentrados de feldspatos em Minas Gerais, e até mesmo de um empreendimento em atividade em Santa Catarina.

### 14.1 Os feldspatos

O nome feldspato tem origem no alemão *feld* (campo) e *spath* (pedra) e no grego *spáthe* (lâmina) (Ramos, 2001).

Depois do quartzo, os feldspatos constituem os minerais mais comuns na crosta terrestre, aparecendo em quase todas as rochas eruptivas e metamórficas, assim como em algumas rochas sedimentares.

Os feldspatos pertencem ao grupo de silicatos de alumínio com potássio, sódio, cálcio e, mais raramente, bário, conforme a composição química:  $X,Al(Al,Si)SiO_2O_8$ , onde  $X = Na, K, Ca$  e  $Ba$ . Pequenas quantidades de  $Li, Rb, Cs$  e  $Sr$  podem ser observadas.

As características gerais dos feldspatos são:

- ◆ dureza (Mohs): 6;
- ◆ cor: variável, sendo a maioria branco, creme ou rosa;
- ◆ peso específico: 2,56 a 2,77;
- ◆ ponto de carga zero (PCZ): 1,4 a 1,6;

# 15

## Flotação de minérios de magnesita e talco

*Paulo Roberto Gomes Brandão  
Arnaldo Lentini da Câmara*

Magnesita e talco são dois minerais industriais muito importantes e que frequentemente ocorrem juntos ou associados, num mesmo contexto geológico, mas nem sempre. No complexo mineiro da Serra das Éguas, em Brumado, centro-sudeste da Bahia, há grande proximidade e mesmo ocorrência conjunta de minérios desses dois minerais. Embora ambos os minérios sejam processados por flotação em alguns lugares do mundo, há poucas referências sobre os processos, e mesmo essas poucas são geralmente lacônicas e pobres em detalhes. Como em Brumado se pratica a flotação tanto de magnesita como de talco, este capítulo descreve os processos, esperando contribuir, ainda que modestamente, para a divulgação do tratamento desses minérios pouco conhecidos em relação à sua importância.

### **15.1 Magnesita**

Entre os elementos que formam a crosta terrestre, o magnésio é o oitavo mais abundante, constituindo 2% da crosta e ocupando, ainda, a terceira posição entre os elementos dissolvidos na água dos mares. Embora seja encontrado em mais de 60 minerais, somente dolomita, magnesita, brucita, periclásio (MgO), carnalita e olivina (forsterita) são de importância comercial. Magnésio e seus compostos são também extraídos a partir de água do mar e salmouras de poços e lagos. Atualmente, porém, a produção comercial a partir de magnesita é a mais econômica.

A principal utilização do magnésio, normalmente sob a forma de óxido, é como material refratário em revestimentos de

# 16

## Flotação de bauxita

Arthur Pinto Chaves

Shaffer (1985), em seu capítulo do *SME Mineral Processing Handbook* sobre alumina, afirma, literalmente, que “as técnicas intrincadas de moagem e beneficiamento comuns na indústria dos metais de base não são usadas com bauxita”. Sua afirmação, embora possa parecer chocante, reflete a verdade de que a concentração de bauxita não é regra na indústria do alumínio. A prática, em todo o mundo, consiste em encontrar depósitos ricos, lavar a bauxita e alimentá-la diretamente a uma refinaria especialmente projetada para as suas características.

Em contrapartida, o Brasil tem longa tradição de aplicar técnicas de beneficiamento à bauxita. A Mineração Rio do Norte (Porto Trombetas, PA) trata a bauxita via desagregação (que chamaremos de “escrubagem”) e deslamagem. A Mineração Santa Lucrécia (Monte Dourado, PA) utilizou a separação em meio denso (*dyna whirlpool* - DWP) para produzir bauxita refratária. A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Itamarati de Minas (MG), usa escrubagem e deslamagem, complementadas por separação densitária em espirais e por separação magnética de alta intensidade, para eliminar minerais de ferro e titânio que diluem a alumina aproveitável. Em sua instalação de Poços de Caldas (MG), ela utilizou, durante certo tempo, *sorting* óptico. A Mineração Rio Pomba (Mercês, MG) utilizou jígues para separar sílica grosseira. Em Paragominas (PA), a Vale, hoje substituída pela Hydro, tem um moinho SAG e um mineroduto (Chaves et al., 2007).

Cerca de 95% da produção brasileira de bauxita é destinada à metalurgia do alumínio pelo processo Bayer:

*Carlyle Torres Bezerra de Menezes*

*André Taboada Escobar*

*Arthur Pinto Chaves*

O aproveitamento e a valorização das frações finas resultantes dos processos de beneficiamento de carvão no Brasil sempre acompanharam as oscilações de mercado e as mudanças na estrutura produtiva da indústria carbonífera. Essa indústria passou por grandes transformações no início da década de 1990, fruto principalmente das mudanças nas políticas econômicas e de utilização de recursos energéticos. O aproveitamento das frações finas e ultrafinas por meio da técnica de flotação, que representou, no passado, grandes volumes produzidos, principalmente para o abastecimento da indústria de coqueificação de carvão, restringe-se atualmente a apenas três empresas, localizadas no Estado de Santa Catarina. Entretanto, em que pese o volume produzido comparativamente menor, o maior valor agregado dos materiais produzidos e o maior aproveitamento desses subprodutos do carvão tornam plenamente justificável o uso da técnica de flotação, tanto em termos econômicos quanto ambientais. Entre outros benefícios, a flotação proporciona maior vida útil às bacias de decantação e maior eficiência nas demais operações unitárias de beneficiamento de finos, tais como as etapas de separação em mesas concentradoras e em espirais de Humphreys.

## **17.1 Breve histórico do processo de flotação de carvão no Brasil**

Das camadas de carvão existentes em Santa Catarina – Barro Branco, Bonito e Irapuá –, a de maior importância e mais

explorada até os dias atuais é a camada Barro Branco, que, além de grandes reservas iniciais, possui a fração de carvão metalúrgico, que até o final da década de 1980 era também a principal fonte de produção dos carvões finos metalúrgicos (Cetem; Canmet, 2000). As camadas de carvão existentes no Rio Grande do Sul, por não possuírem frações finas com características superficiais favoráveis para a recuperação por meio do processo de flotação, pelo menos conforme o conhecimento técnico e as variáveis econômicas atuais, não motivaram a instalação, em escala industrial, de unidades de flotação dos finos gerados no processo de beneficiamento.

No que se refere ao Estado de Santa Catarina, o pré-beneficiamento era realizado em lavadores construídos junto às unidades de extração para a produção de um carvão pré-lavado (granulometria maior que 0,60 mm) e enviado ao Lavador de Capivari (Lavacap) na cidade de Capivari de Baixo, para a separação das frações de carvão metalúrgico das demais frações de carvão mineral. Essa usina de beneficiamento pertencia à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), antiga Carbonífera Próspera. A fração metalúrgica era obrigatoriamente comprada pela indústria siderúrgica nacional, sendo o carvão CE 5.200 (com poder calorífico de 5.200 kcal/kg) destinado principalmente à indústria cimenteira, e o CE 4.500 (com poder calorífico de 4.500 kcal/kg), usado na geração de energia no complexo termoeletrico em Capivari de Baixo.

Como esse modelo de entrega de carvão ao Lavacap não remunerava as frações finas, ocorria na região um interesse de recuperação nos pré-lavadores das frações menores que 0,60 mm, principalmente da fração metalúrgica, que era obtida pelo processo de flotação em células convencionais e atendia ao mercado das coquerias locais. As frações energéticas finas eram descarregadas em bacias de decantação, pois possuíam um preço de venda não muito interessante, ou eram comercializadas com a indústria cimenteira e com outros mercados com baixo consumo, como cerâmicas e indústrias de alimentos.

# 18

## O processo de condicionamento em alta intensidade (CAI) na flotação de minérios

Jorge Rubio

### 18.1 A problemática da recuperação de finos de minérios

A concentração de minérios por flotação apresenta boa eficiência em uma dada faixa de tamanho de partícula, fora da qual a recuperação de finos ou grossos é muito baixa. Essa faixa de tamanho depende da espécie mineral, da escala de operação e da concentração de reagentes, e flutua para os minérios entre 5  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ . Em razão da baixa recuperação, principalmente nas frações finas e grossas, milhares de toneladas de rejeitos com altos teores têm sido depositadas em barragens, gerando custos operacionais, perdas de produção e, em muitos casos, problemas ambientais. Há um grande interesse na exploração sustentável desses rejeitos ou “minérios complexos”.

Os principais problemas e características observados na flotação de partículas finas (“F”, < 38-13  $\mu\text{m}$ ) e ultrafinas (“UF”, < 13  $\mu\text{m}$ ) são:

- ◆ elevada área superficial por unidade de massa, o que acarreta um maior consumo de reagentes e a formação de espumas mais resistentes e torna a filtragem mais difícil;
- ◆ as partículas possuem baixa quantidade de movimento (*momentum*), o que facilita o arraste hidrodinâmico pelas linhas de fluxo de água e leva a uma menor energia de colisão com as bolhas de ar;
- ◆ essas frações são mais passíveis ao mecanismo de *slimes coating* (recobrimento por lamas), seja em razão da sua alta área superficial, tornando-as assim mais reativas, seja pela baixa quantidade de movimento, o que implica uma

# 19

## Tratamento de água na mineração

*Magno Meliauskas*

A preocupação crescente com o impacto das atividades de mineração sobre o meio ambiente tem acarretado estudos visando tanto à utilização racional dos recursos hídricos quanto ao tratamento das águas descartadas durante o processo de beneficiamento mineral. O presente capítulo apresenta alguns aspectos relacionados à política e ao gerenciamento dos recursos hídricos e aborda também alguns conceitos básicos de Hidrogeologia. Os processos tradicionais e potenciais para o tratamento das águas oriundas das atividades de lavra e do processamento mineral são igualmente discutidos.

O processo de gerenciamento de recursos hídricos envolve componentes multidisciplinares, visto que precisa atender a diferentes objetivos, sejam econômicos, ambientais ou sociais. Entre esses componentes, a engenharia de recursos hídricos busca adequar a disponibilidade e a necessidade de água em termos de espaço, tempo, quantidade e qualidade. Seu trabalho está relacionado aos diversos usos da água, em que se pode destacar infraestrutura social, agricultura, florestamento, aquacultura, indústria, mineração, conservação e preservação. Esses usos da água podem ser consuntivos, não consuntivos e locais. O emprego consuntivo da água provoca a sua retirada da fonte natural, diminuindo sua disponibilidade espacial e temporal (p. ex., agricultura, processamento industrial e uso doméstico). Por sua vez, no uso não consuntivo, praticamente toda a água utilizada retorna à fonte de suprimento, podendo haver modificação na sua disponibilidade e nas suas características ao longo do tempo (p. ex., recreação, piscicultura e mineração). O uso local não provoca modificações relevantes na disponibilidade da água.



# Pesquisa e desenvolvimento em flotação

# 20

*Armando Corrêa de Araujo  
Paulo Roberto de Magalhães Viana  
Antônio Eduardo Clark Peres*

“Sem o desenvolvimento da flotação em espumas, a indústria mineral não existiria como a conhecemos hoje. Aproximadamente todo o suprimento de vários metais (cobre, chumbo, zinco, prata, molibdênio, cobalto...) depende diretamente de operações de flotação em espumas.” Com essas palavras, Cases (2002) praticamente repete a afirmação feita 40 anos antes por Milliken (1962). Milliken e Cases vão mais longe ao ressaltar a importância da introdução do processo de flotação na indústria mineral, afirmando que, desde a descoberta da fusão dos metais, nenhum outro processo foi tão importante para o aumento da produção dos minerais e, conseqüentemente, para o desenvolvimento da sociedade nos seus moldes atuais.

A flotação hoje se aplica em praticamente todos os tipos de recursos minerais. Entre os recursos metálicos, é o processo básico para a concentração de cobre, chumbo, zinco, cádmio, cobalto, prata, molibdênio, nióbio e platinoides (PGM), e destaca-se consideravelmente em termos de aplicação para ferro, níquel, terras-raras, tungstênio, estanho e ouro. Com relação aos bens minerais não metálicos, existem aplicações de flotação para a concentração de vários silicatos (talco, quartzo, feldspato, micas, espodumênio etc.), carbonatos (calcita, magnesita, dolomita), sulfatos (barita), boratos, além de ser extremamente importante na concentração dos fornecedores de matéria-prima para a indústria de fertilizantes (fosfatos e silvita). Aplica-se a flotação também para a concentração de grafita, enxofre, fluorita e para a eliminação de impurezas ferrotitaníferas da caulinita. No âmbito dos recursos minerais energéticos, a flotação é aplicada na limpeza de carvões e

Os óleos de constituição variada e, geralmente, desconhecida que eram usados nos primórdios da flotação foram sendo gradualmente substituídos por reagentes de composição definida e características peculiares aos coletores de minérios. A Clariant é pioneira em reagentes para flotação, atuando há mais de 60 anos nesse ramo da indústria.

Ela oferece uma ampla variação de reagentes com funções diversificadas, como coletores, espumantes e agentes modificadores para todas as etapas de flotação.

Nesses 60 anos, além dos produtos de flotação, a Clariant tem fornecido reagentes para diferentes operações do Tratamento de Minérios:

- i classificação - dispersantes para deslamagem;
- ii espessamento e clarificação - floculantes para otimização do desaguamento em espessadores;
- iii filtração - auxiliares de filtragem para redução de umidade da torta;
- iv pelotização - aglomerantes para pelotização;
- v lixiviação - extratantes de produtos de lixiviação.

Além disso, a Clariant produz emulsificantes para explosivos, supressores de pó para pilhas de armazenamento, vagões, frentes de lavra e estradas e, finalmente, no tratamento de água, floculantes, anticorrosivos e anti-incrustantes.

## **21.1 Coletores**

São compostos heterogêneos, constituídos de um grupo inorgânico ativo e uma cadeia hidrocarbônica. A parte inorgâ-

## **Alberto Augusto Rebelo Biava**

Natural de Batatais (SP), formou-se engenheiro de minas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) em 1966. Especializou-se em beneficiamento de minerais não ferrosos.

Iniciou sua vida profissional na Mineração Boquira (BA), como engenheiro da Mina Cruzeiro, mina de chumbo e zinco. Posteriormente trabalhou na Companhia de Cimento Itambé, na pesquisa de calcário e argila. Por duas ocasiões prestou serviços para a Paulo Abib Engenharia, participando principalmente de projetos na área de não ferrosos (Zn, Pb, Cu e Sn). Participou, em todas as fases, do Projeto Caraíba (BA), hoje Mineração Caraíba; do Projeto Expansão de Camaquã (RS); e em vários estudos de desenvolvimento de processo para vários minérios de cobre da Bahia, Sergipe, Rio Grande do Sul, Goiás e Pará, pelo Ceped (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, BA). Trabalhou, ainda, para a empresa de engenharia Jaakko Pöyry Engenharia, em diversos estudos e projetos.

Para a Votorantim Metais (VM), prestou serviços de 1998 a 2005, inicialmente como Gerente de Projetos de Engenharia do setor de mineração da Companhia Mineira de Metais (CMM) (Zn e Pb) e, posteriormente, como Gerente de Desenvolvimento Tecnológico da VM (Zn, Pb, Ni e tratamento e recuperação de resíduos industriais do Grupo Votorantim), tendo participado de vários estudos de melhorias nas atuais operações e em novos projetos da CMM,



da Companhia Níquel Tocantins (Ni sulfetado e laterítico) e da Mineração Serra da Fortaleza (Ni sulfetado).

Desde 2005, presta serviços para a Minerconsult Engenharia, tendo participado do Projeto Expansão III (Au), da Rio Paracatu Mineração (RPM), para processar 41 Mtpa de minério; do Projeto Barro Alto (Ni), da Anglo Base Metals, para a produção de 158.000 t/ano de FeNi; e do Projeto Bayovar (fosfato do Peru), para a produção de 3,9 Mtpa de concentrado de rocha fosfática. Atualmente participa de dois projetos de minério de cobre: Projeto Chapada (GO), da Mineração Maracá Ind. e Com. (Yamana Gold), de expansão para 32 Mtpa de minério; e Projeto Serrote da Laje (AL), da Mineração Vale Verde (Aura Minerals), para processamento de 15 Mtpa de minério.



### **André Taboada Escobar**

Graduado em Engenharia Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC/RS) em 1982, fez pós-graduação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Em janeiro de 1983, iniciou sua carreira profissional na Carbonífera Metropolitana, onde permanece até hoje, com as seguintes atribuições:

- a) Complexo Esperança/Fontanella - responsável pela área de processos industriais das unidades de beneficiamento:
- unidade de beneficiamento mina Esperança;
  - unidade de beneficiamento mina Fontanella;
  - unidade de beneficiamento de concentração de pirita;
  - circuito de mesas concentradoras de reprocessamento de finos;
  - unidade de secagem e moagem de carvão mineral;
  - laboratório de análises e ensaios de carvão mineral;
  - operação e logística do transporte de carvão mineral;
  - responsável pela estação de tratamento de água;
  - tratamento e abastecimento de água potável e industrial;