

PROCESSO DE FLOTAÇÃO APLICADO AO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS: COLUNA DE FLOTAÇÃO X CÉLULA MECÂNICA

William de Paiva Santos¹

Leandro Alves Rezende²

RESUMO

A flotação é um processo de beneficiamento mineral utilizado em larga escala pelas indústrias minerais, para a concentração de diferentes tipos de minérios, esse processo possibilita o aproveitamento de minérios de baixo teor, que de outra forma não seriam utilizados. Segundo estimativas foram beneficiados mais de 3 bilhões de toneladas pelo processo de flotação em todo mundo, no ano de 2014. Devido à importância do processo e a sua ampla utilização para o beneficiamento de minérios, o presente artigo tem como finalidade descrever o processo de flotação, e realizar uma comparação no desempenho da coluna de flotação e célula mecânica para o processo de beneficiamento de minérios, sendo esses os principais equipamentos utilizados no processo de flotação. Para o desenvolvimento desse estudo, foi necessário realizar uma revisão bibliográfica através de livros e artigos específicos relacionados ao processo de flotação. Através da comparação do processo de flotação em coluna e em célula mecânica para o beneficiamento de minérios, a coluna demonstrou algumas vantagens no processo como recuperação, teor e custo em comparação a célula mecânica. Um outro ponto é que a coluna de flotação tem maior capacidade de recuperação de partículas finas, melhorando assim o rendimento do processo. Dessa forma a coluna de flotação vem substituindo ou trabalhando em conjunto com as células mecânicas em forma de circuito, proporcionando assim melhores resultados no processo.

Palavra-chave: Concentração de Minérios, Processo de Flotação, Máquinas de Flotação.

¹ SANTOS, William de Paiva. Graduando em Engenharia de Produção na UNIVERSO/Juiz de Fora, MG, 2017.

²REZENDE, Leandro Alves. Professor na UNIVERSO/Juiz de Fora. Mestre em Física pela Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, 2017.

1 Introdução

A diminuição das reservas minerais de alto teor e o aumento da demanda mundial de metais, têm proporcionado à indústria mineral grande desafio no beneficiamento de minérios de grande complexidade, a fim, de atender às especificações cada vez mais exigentes do mercado.

Para Oliveira (2007, p. 133) “o desenvolvimento da indústria mundial nos últimos cem anos não teria sido possível sem a descoberta do processo de flotação”.

A flotação é um dos processos mais utilizados na indústria mineral para o beneficiamento de minérios de baixo teor. Ela é uma técnica de separação de partículas minerais, que explora a diferença na propriedade da superfície das partículas, sendo baseada na capacidade de bolhas de ar aderirem em superfícies minerais específicas em uma mistura entre água e minério. A flotação pode ser adotada para a separação de vários tipos de minerais, atualmente ele é utilizada para a produção de: concentrados sulfetados de cobre, chumbo, zinco, molibdênio, sulfetos contendo ouro, concentrados de cloreto de potássio e entre outros tipos de minerais. Segundo estimativas foram beneficiados mais de 3 bilhões de toneladas de minérios pelo processo de flotação em todo mundo no ano 2014. (SCHNEIDER ET AL., 2016).

Dois tipos de equipamentos de flotação são os mais utilizados em escala industrial: coluna de flotação e célula mecânica. A coluna sendo uma tecnologia mais recente (1961), e a célula mecânica que tem ampla utilização principalmente pelo fato do início do processo de flotação (1906), somente esse tipo de equipamento era utilizado na indústria.

Devido à importância do processo e a sua utilização em larga escala para o beneficiamento de minérios, o presente trabalho tem como objetivo descrever o processo de flotação, e realizar uma comparação no desempenho da coluna de flotação e célula mecânica para o processo de beneficiamento de minérios.

“O avanço da aplicação da flotação no Brasil deverá ter posição de destaque, haja visto as substâncias recursos minerais do país e a já consolidada aplicação desta tecnologia nas usinas de beneficiamento de minérios do país” (SCHNEIDER ET AL., 2016, p. 261).

2 Referencial Teórico

A flotação é um dos processos de concentração mais utilizados na indústria mineral, possibilitando o aproveitamento de minérios de baixo teor, que de outra forma não seriam utilizados.

2.1 Processo de Flotação

Flotação é um processo de separação de partículas sólidas, que se baseia na introdução de bolhas de ar que atravessa as partículas em suspensão na solução, com isso as partículas de interesse se aderem às bolhas formando uma espuma que pode ser retirada da solução. A seletividade do processo de flotação se baseia nas superfícies de diferentes espécies minerais presentes, que podem apresentar diferentes graus de hidrofobicidade (fobia a água) e hidrofiliabilidade (afinidade com a água) (CHAVES ET AL., 2010).

2.1.1 Hidrofobicidade e Hidrofiliabilidade

Segundo Peres e Araujo (2006), a hidrofobicidade está associada a molhabilidade da partícula pela água, existe partículas que apresentam grande afinidade pela água e, portanto, tendem a ficar em solução, sendo conhecidas como partículas hidrofílicas. Dessa forma, quando há presença de uma corrente de ar, as partículas hidrofóbicas que tem fobia à água tendem a ir para superfície da coluna, justamente por não apresentarem afinidade com a água.

Dessa forma seria possível separar as partículas hidrofóbicas de hidrofílicas apenas com uma corrente de ar passando através da polpa em solução. As hidrofílicas permaneceriam em suspensão e as hidrofóbicas seriam arrastadas pelo ar. No entanto, a corrente de ar que passa pela polpa em suspensão não é suficiente para realizar essa separação, sendo necessário a adição de reagente conhecido como espumante. Esse reagente permite a formação de uma espuma que leva as bolhas de ar ajudando, assim, na separação das partículas (PERES & ARAUJO, 2006).

De acordo com Chaves et al., (2010), os minerais hidrofílicos podem ter a sua superfície modificada para hidrofóbicos através da adição de reagentes chamados de coletor. O coletor deve ser seletivo, atuando apenas nas partículas minerais de interesse, que serão separadas pelo processo, deixando as demais na solução. A seletividade do processo de flotação está ligada à liberação do material de interesse e que ele se apresente liberado dos minerais que deverão ficar no rejeito do processo.

2.1.2 Reagentes de Flotação

Segundo Peres e Araujo (2006), os reagentes da flotação são classificados em coletores, espumantes e modificadores

- **Coletores:** Os coletores são reagentes que atuam na interface sólido-líquido do processo, esse reagente tem o papel de alterar a característica da superfície do mineral, assim

modificando de hidrofílica para hidrofóbica, fazendo com que a partícula de interesse acompanhe o fluxo de ar.

- Espumante: O espumante atua na interface líquido-gás do processo, ele é utilizado nesse processo tendo a finalidade de promover uma estabilidade das bolhas de ar fazendo com que a mesma não se rompa durante suas contrações e expansões, atua também dando estabilidade na espuma.

- Modificadores: São reagentes quem a finalidade de fazer com que a superfície do mineral seja atrativa para o coletor durante o processo de flotação, dessa forma esse reagente favorece ou inibe a ação do coletor sobre a superfície do mineral.

Os reagentes que são utilizados no processo devem ser alimentados em pontos diferentes dentro do circuito de flotação, devido que cada reagente específico pode demandar maiores ou menores tempos de condicionamento (CHAVES ET AL., 2010).

2.2 Equipamentos de Flotação

Segundo Peres e Araujo (2006, p. 1) “as máquinas de flotação se caracterizam por possuírem mecanismos capazes de manter as partículas em suspensão e de possibilitar a aeração da polpa”.

Em 100 anos de existência da flotação foram desenvolvidos e utilizados muitos equipamentos, um desses equipamentos consolidou-se na prática industrial, a célula mecânica. Na busca do aprimoramento, desenvolvimento de novos equipamentos, e de melhores resultados no processo, “um novo equipamento revolucionou o universo de máquinas de flotação, a partir dos anos 80 do século passado: a coluna de flotação” (PERES & ARAUJO, 2006, p. 28). A coluna de flotação teve início em 1961 pelos pesquisadores canadenses Remy Trembly e Pierre Boutin que registraram uma patente referente a técnica, a partir daí começaram vários estudos e testes experimentais em escala de laboratório, a primeira aplicação em escala industrial só ocorreu em 1980, em Les Mines Gaspé, Canadá, onde a coluna de flotação obteve bons resultados substituindo um banco de células mecânicas convencionais (AQUINO ET AL., 2010).

2.2.1 Coluna de Flotação

Conforme Takata (2006), o processo de flotação em colunas está presente em várias instalações industriais de concentração, utilizados para diferentes tipos de minerais tais como: cobre, feldspato, grafite, zinco, chumbo, talco, prata, nióbio entre outros.

Apesar da grande diversidade de tipos de colunas de flotação, o modelo que apresenta maior aplicação em escala industrial em todo mundo, é aquela conhecida como coluna Canadense, exemplificada na Figura 01 (TAKATA, 2006).

Segundo Takata (2006), uma coluna de flotação pode ser dividida em duas seções:

- Zona de coleta ou recuperação: está entre o ponto de entrada de ar e a interface polpa-espuma. Seu objetivo é recuperar o mineral a ser flotado, através do contato das partículas com as bolhas de ar;

- Zona de limpeza: Está entre a interface polpa-espuma até o transbordo do flotado, nessa fase é lavada a camada de espuma com uma água que está contra a corrente, buscando eliminar as partículas hidrofílicas arrastadas pelas bolhas de ar;

Para Aquino et al., (2010) a coluna de flotação difere-se da célula mecânica nos seguintes aspectos:

- Geometria (relação altura: diâmetro)
- Água de lavagem na camada de espuma;
- Ausência de agitação mecânica;
- Sistema de geração de bolhas;

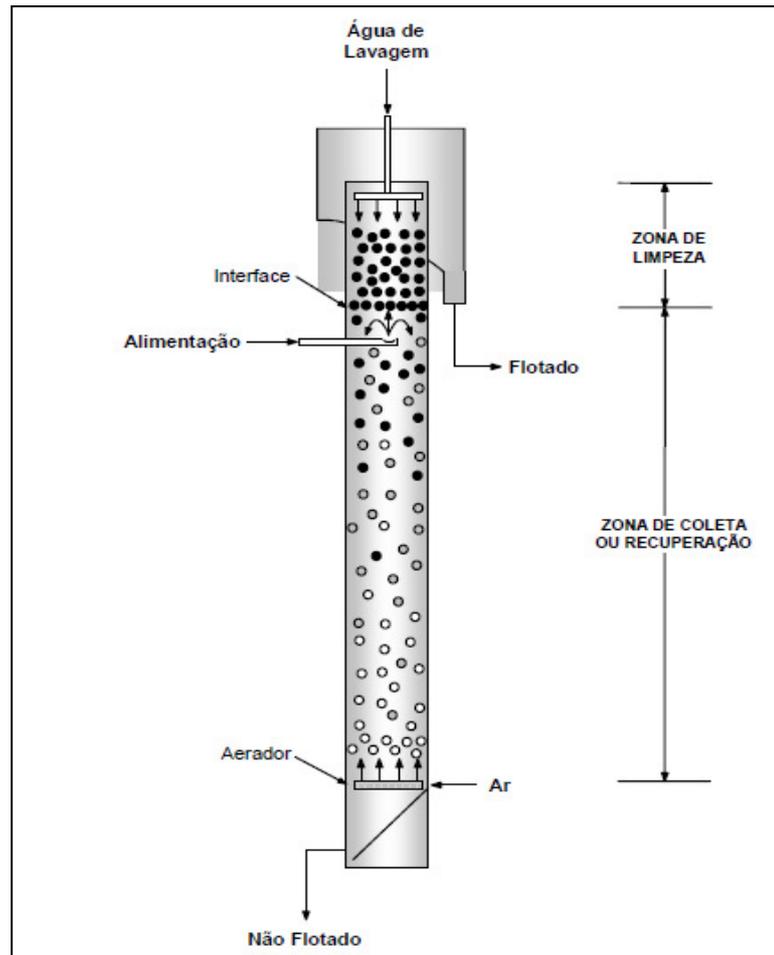


Figura 01: Esquema geral da Coluna de Flotação
Fonte: Livro Tratamento de Minérios (2010)

De acordo com Aquino et al., (2010), o processo de flotação em coluna, ocorre através da alimentação da coluna, com o material (polpa) que é condicionado com reagentes específicos em etapas anteriores (Condicionamento). Esse material alimenta a coluna aproximadamente dois terços da sua altura total, em contracorrente com o fluxo ascendente de ar alimentado na base da coluna. Esse ar tem por finalidade gerar bolhas de ar ascendentes para coletar às partículas hidrofóbicas, transportando-as para a zona de limpeza onde entram em contato com a espuma.

O processo da flotação utiliza o conceito de contracorrente para fazer o contato do fluxo descendente da polpa com o fluxo de ar ascendente sendo que, essa colisão entre as partículas e as bolhas de ar, faz com que ocorra a captura das partículas de interesse formando, assim, uma espuma constituindo o flotado, que transborda. No topo da coluna é utilizada água de lavagem, que tem como função estabilizar e lavar a camada de espuma que se forma, eliminando, assim, possíveis partículas hidrofílicas que se arrastaram até o topo da coluna. O

material não flotado e retirando pelo fundo da coluna, através de uma tubulação fixa em sua base (AQUINO ET AL., 2010).

A figura 02 demonstra um conjunto de colunas de flotação da empresa Samarco Mineração.



Figura 02: Colunas de Flotação da Empresa SAMARCO MINERAÇÃO.
Fonte: Livro Flotação: O Estado da Arte no Brasil (2006).

2.2.2 Célula Mecânica de Flotação

“Vamos distinguir dois elementos construtivos – a máquina de flotação e a célula, aqui compreendida como volume dentro do qual a máquina atua e o processo de flotação se desenvolve” (CHAVES, 2006, p. 34).

As células são tanques projetados para receber a polpa continuamente, por uma das suas faces laterais, e descarrega-la por sua face oposta, cada unidade desses tanques é chamado de célula. As células podem ser individuais, mas a regra é ter um conjunto de células, afim, de garantir que todas as partículas de interesse sejam flotadas. Em uma extremidade do conjunto de células se tem um compartimento de alimentação e na extremidade oposta, um compartimento de descarga (CHAVES, 2006).

Segundo Chaves (2006) existe modelos de células fechadas, mas a tendência é não usar divisões entre uma célula e outra. Através da alimentação que ocorre na célula em uma de suas faces laterais, a espuma sobe gerando assim um transbordo do flotado, que cai sobre calhas dispostas ao longo da extensão do conjunto de células. O material que não foi flotado é arrastado pela corrente de água saindo pelo fundo da célula, e seguindo para a próxima célula do conjunto, esse processo acontece até o material chegar na caixa de descarga que finaliza o todo o processo. A figura 03 exemplifica um conjunto de células de flotação.

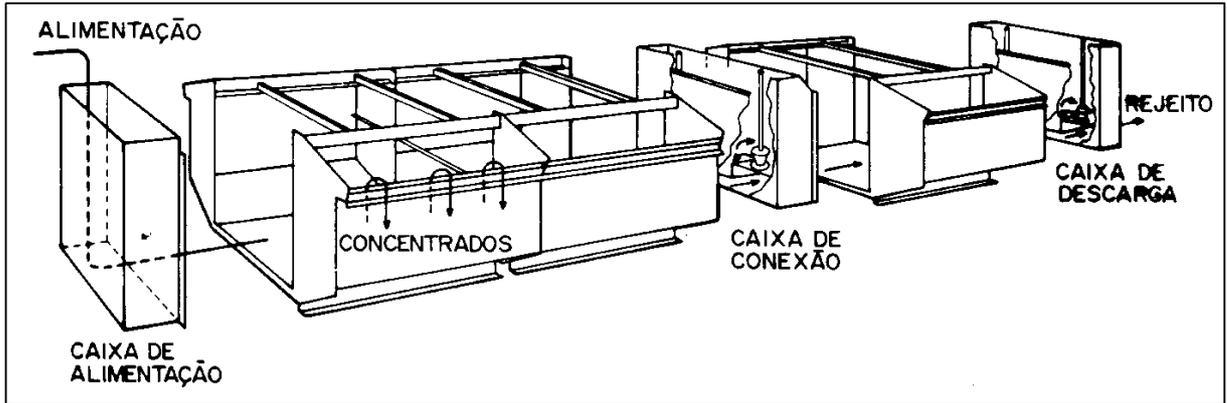


Figura 03: Conjunto de Células de Flotação.
Fonte: Livro Tratamento de Minérios (2010).

De acordo Chaves (2006), a máquina de flotação exemplificada na figura 04 e instalada dentro da célula, ela consiste em um rotor, no fundo da célula, acionado e suspenso por um eixo. O rotor tem como função fornecer a energia mecânica necessária para manter a polpa agitada e em suspensão. “O movimento rotacional do rotor gera pressão negativa dentro da polpa. O ar é aspirado e passa pelo tubo dentro do qual gira o eixo. Em muitos casos, esta aspiração é suficiente para a flotação” (CHAVES, 2006, p. 35). Mas há casos de máquinas de flotação em que se injeta ar comprimido para dentro da célula, provocando assim um maior controle sobre essa variável do processo.

Para se conseguir um bom resultado nesse processo de flotação, é necessário um número muito grande de bolhas de pequeno diâmetro (1mm), afim, de capturar o maior número possível de partículas. Se gera essas pequenas bolhas colocando, em torno do rotor, uma peça denominada estator, que tem como objetivo fragmentar as bolhas de ar (CHAVES, 2006).

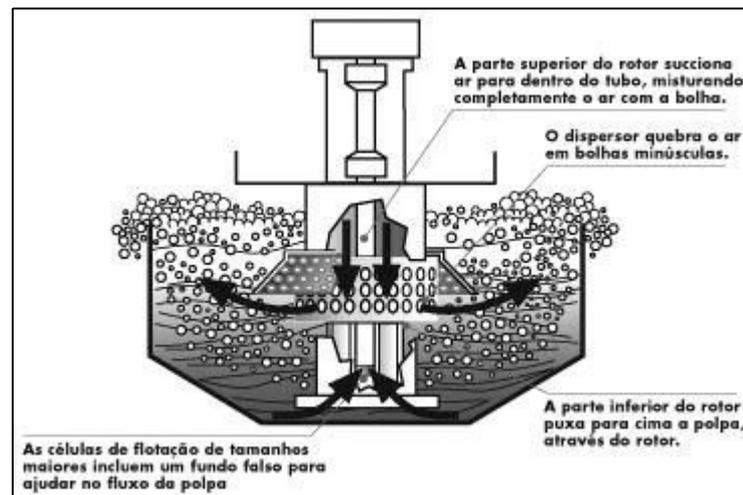


Figura 04: Máquina de Flotação (Modelo Wemco).
Fonte: Livro Tratamento de Minérios (2010).

Com a polpa em suspensão devido ao movimento do rotor, e a geração de pequenas bolhas que carregam até a superfície as partículas de interesse formando assim o flotado, que transborda no topo e cai sobre calhas dispostas ao longo da extensão da célula de flotação (CHAVES, 2006).

3 Materiais e Métodos

O método utilizado para realizar o presente trabalho foi uma revisão bibliográfica através de livros e artigos específicos do tema da pesquisa, encontrados com as palavras chaves, processo de flotação, coluna de flotação, célula mecânica, concentração de minérios.

4 Resultados/Discussões

Dois tipos de equipamentos são hoje os mais utilizados em escala industrial para o processo de flotação sendo eles a célula mecânica e coluna de flotação. A partir do uso da coluna em escala industrial para processo de flotação, ocorreu de muitas empresas substituírem seus bancos de células mecânicas por colunas. Diante disso existe uma grande discussão para saber qual equipamento é mais indicado para o processo. A seguir uma comparação entre a célula mecânica e coluna canadense para o processo de flotação.

4.1 Coluna de Flotação X Células Mecânicas

De acordo com Aquino (et al., 2010) a coluna se difere das células mecânicas principalmente pelo design quanto pela forma de operação. Foram realizados vários estudos comparativos entre os dois modelos para processo de flotação tanto em escala piloto quanto industrial, permitindo assim uma análise de alguns fatores como recuperação, teor e custo.

4.1.1 Recuperação

Segundo Aquino et al., (2010), uma das principais perdas do processo de flotação e devido as frações de granulometria fina e grossa. A coluna consegue gerar bolhas de tamanho controlado e diâmetros inferiores comparados as células mecânicas. Além disso a coluna consegue ter uma maior área superficial de bolhas, aumentando a probabilidade de uma colisão entre as bolhas de ar e as partículas minerais, gerando assim uma maior recuperação das partículas finas.

Um ponto que merece destaque é o tempo de residência das bolhas na coluna, como as bolhas são geradas na base da coluna elas percorrem todo o comprimento da seção de recuperação da coluna. Todos esses fatores combinados resultam em uma maior recuperação

de partículas finas, obtendo assim um melhor resultado de recuperação (AQUINO ET AL., 2010).

4.1.2 Teor

De acordo com Aquino et al., (2010) a coluna de flotação consegue produzir na fração flotada, um concentrado com teores mais elevados do que em comparação as células mecânicas, devido a alguns fatores:

- Ausência de turbulência na interface polpa\espuma, diminuindo o arraste de partículas hidrofílicas;
- O tamanho da camada de espuma, apresentado um efeito de filtro das partículas hidrofílicas arrastadas pelas bolhas de ar;
- Utilização de água de lavagem no topo da coluna, diminuindo a quantidade de partículas hidrofílicas arrastadas da seção de recuperação para a de limpeza, fazendo assim uma lavagem das bolhas de ar;

Esses meios de limpeza são um dos principais motivos para a utilização da coluna, através deles se consegue obter concentrados com teores mais elevados.

4.1.2 Custo

Para Aquino et al., (2010) a produção de uma mesma quantidade em um circuito de flotação em colunas, tem um investimento menor comparado a um circuito de células mecânicas, devido alguns fatores:

- Menor número de etapas de limpeza;
- Uma quantidade menor de equipamentos auxiliares e ausência de peças moveis na coluna;
- Possui um menor número de pontos de controle;
- Necessita de menor espaço para alocação;

Devido ao menor número de equipamentos e a ausência de peças moveis o custo com a operação e manutenção da coluna e menor do que em comparação a célula mecânica.

Com esses fatores que diferenciam a coluna de flotação da célula mecânica e aos bons resultados alcançados nas unidades industriais, a coluna de flotação vem ganhando espaço no cenário mineral brasileiro. A tabela 01 está relacionando ao número de instalações de colunas de flotação no Brasil até o ano de 2007 e suas respectivas aplicações industriais.

Tabela 01: Número de Instalações de Colunas de Flotação no Brasil até o ano 2007.
Fonte: Livro Tratamento de Minérios (2010).

Minério/Mineral	Quantidade
Ferro	93
Fosfato	35
Cobre	23
Nióbio	5
Chumbo/Zinco	4
Grafita	4
Feldspato	3
Talco	2
Prata	2
Total	171

5 Conclusão

A flotação é um dos processos de beneficiamento mais utilizado pelas indústrias minerais, sendo responsável pela produção de vários tipos de concentrados. Algo que contribuiu muito com o crescimento da flotação, foi a introdução da coluna como forma de processo de concentração, desde do início dos estudos em torno da coluna seja em plantas pilotos ou em utilização industrial ela veio demonstrando bons rendimentos e resultados satisfatórios.

A coluna de flotação e a célula mecânica se diferem tanto no *design* quanto na sua forma de operação, a coluna demonstrou algumas vantagens como recuperação, teor e custo em comparação a célula mecânica.

Antes da coluna havia perdas no processo de flotação devido à baixa capacidade de recuperação de partículas de granulometria fina por parte da célula mecânica. A coluna consegue gerar bolhas de tamanho controlado e diâmetros inferiores, como as bolhas são geradas em sua base se consegue ter uma maior área superficial de bolhas, fazendo que as bolhas percorram toda seção da coluna, aumentando a probabilidade de uma colisão entre as bolhas de ar e as partículas minerais, juntando todas essas características particulares da coluna, se consegue gerar uma maior recuperação das partículas finas, dessa forma melhorando o rendimento do processo.

Devido aos bons resultados alcançados e pela melhor capacidade na recuperação de partículas finas, a coluna de flotação vem ganhando grande destaque nas empresas do ramo, o

número de colunas tanto no Brasil como no mundo vem aumentando, juntamente com sua aplicação industrial para diferentes tipos de minérios, com isso a coluna vem substituindo ou trabalhando em conjunto com as células mecânicas, em forma de circuito, proporcionando assim melhores resultados no processo.

Como sendo a principal forma de beneficiamento o processo de flotação está em constante estudo e aperfeiçoamento tanto da técnica como dos equipamentos, buscando assim agregar melhores resultados no processo de concentração de minerais.

6 Referências

AQUINO, J. A., OLIVEIRA, M. L. M., e FERNADES, M. D. Flotação em Coluna. In: LUZ, A. B. et al. **Tratamento de Minérios**. 5º Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.12, p. 517-965.

CHAVES, A. P., FILHO, L. S. L., e BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B. et al. **Tratamento de Minérios**. 5º Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.11, p. 465-965.

CHAVES, A. P. Máquinas de Flotação. In: **Flotação: O Estado da Arte no Brasil**. São Paulo: Signus Editora, 2006. Vol.4, Cap.2, p. 31-446.

OLIVEIRA, J. F. Flotação. In: LUZ, A. B. et al. **Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap.2.3, p. 133-380.

PERES, A. E. C., ARAUJO, A. C. A Flotação como Operação Unitária no Tratamento de Minérios. In: CHAVES, A. P. **Flotação: O Estado da Arte no Brasil**. São Paulo: Signus Editora, 2006. Vol.4, Cap.1, p. 1-446.

SCHNEIDER, C. L., MATIOLO, E., NEUMANN, R., et al. Beneficiamento de Minérios. In: MELFI, A. J. et al. **Recursos Minerais no Brasil: Problemas e Desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. Cap.3, p. 256-420.

TAKATA, L. A. Flotação em Coluna. In: CHAVES, A. P. **Flotação: O Estado da Arte no Brasil**. São Paulo: Signus Editora, 2006. Vol.4, Cap.3, p. 45-446.

