

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

MONOGRAFIA

**Estudo Comparativo Entre Equipamentos
de Flotação**

Aluno: Bernard Frankó Ribeiro

Orientador: Prof. Rísia Papini

Março 2015

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho
a minha mãe, esposa e irmãos.*

AGRADECIMENTOS

- A Prof. Risia Magriotis Papini, minha orientadora, pela sua atenção durante a preparação do trabalho.
- Aos colegas de trabalho pelo incentivo.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.
- A minha esposa pelo apoio incondicional em toda trajetória.
- A minha mãe pelo incentivo diário, me proporcionando condições para avançar sempre.
- Aos amigos e amigas que não foram citados e que sempre estiveram comigo me auxiliando.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA	9
3. DESENVOLVIMENTO.....	10
3.1. Aspectos básico da flotação do minério de ferro	10
3.2. Equipamentos de flotação.....	12
3.2.1. Células convencionais	13
3.2.2. Células tanques.....	19
3.2.3. Colunas de flotação	21
3.2.4. Célula pneumática.....	26
4. CONCLUSÕES.....	29
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

RESUMO

A importância da flotação como processo de concentração de minerais tem provocado o desenvolvimento e aprimoramento das máquinas de flotação, visando tornar essa operação cada vez mais eficiente em termos produtivos e econômicos. Desta forma, o presente trabalho realizou uma revisão conceitual sobre a operação de concentração de minério por flotação, destacando a importância deste processo, realizando o levantamento dos principais equipamentos e como as variáveis operacionais influenciam esta operação unitária, levando em consideração as principais características dos equipamentos na separabilidade dinâmica entre outras. Nos trabalhos consultados, podemos perceber o quanto a hidrodinâmica dos equipamentos e a distribuição do tamanho das bolhas geradas, tornam-se importantes variáveis na seqüência dos eventos que levam à flotação de partículas minerais. O estudo dos equipamentos mostra como as colunas de flotação são mais adequadas ao tratamento de minérios de granulometria fina e ultrafina. Por outro lado, o uso de células de grandes volumes tem se tornado uma tendência, em função de considerações econômicas que favorecem este equipamento através do efeito escala. As células pneumáticas por se tratarem de equipamentos sem partes móveis e pelo baixo tempo de residência das partículas são equipamentos de tamanho reduzido que apresentam baixo custo com infraestrutura em comparação com os demais equipamentos.

Palavras-chave: flotação, máquinas de flotação, equipamentos de flotação.

ABSTRACT

The importance of flotation as mineral concentration process has led to the development and improvement of flotation machines, in order to make this more and more efficient operation in production and economic terms. In this way, the work performed a conceptual review of the ore concentration by flotation, highlighting the importance of this process, carrying out a survey of major equipment and how operating variables affect this unit operation, taking into account the main characteristics of equipment in separability dynamics, performance and so on. In the studies reviewed, we can see how the hydrodynamics of the equipment and the size distribution of generated bubbles become important variables in the sequence of events that lead to the flotation of mineral particles. The study shows the equipment as flotation columns are more suited to the treatment of fine particle size of ultrafine minerals. Moreover, the use of large volumes of cells has become a trend, due to economic considerations favor this effect device via the scale. Pneumatic cells since they are devices with no moving parts and low residence time of the particles, reduced size of equipment that have low cost infrastructure compared to other equipment.

Keywords: flotation, flotation machines, flotation equipment.

1. INTRODUÇÃO

A flotação é um dos processos de concentração mais utilizados na indústria mineral, possibilitando o aproveitamento de minérios complexos e/ou de baixo teor de forma econômica e com rendimentos satisfatórios (Oliveira e Aquino, 2006), além de ser um dos mais versáteis meios de processamento mineral uma vez que sua aplicação se estende a uma grande variedade de minérios com diferentes granulometrias, composições químicas, mineralógicas e, principalmente, diferentes propriedades físico-químicas.

O desenvolvimento da indústria mundial nos últimos cem anos não teria sido possível sem a descoberta do processo de flotação. Os processos físicos tradicionais, gravimétricos, magnéticos e eletrostáticos, em grande parte baseados nas propriedades naturais dos minerais, não teriam possibilitado a escala de produção necessária dos metais básicos – cobre chumbo, zinco e níquel – a partir dos sulfetos minerais. Também não teria sido possível a produção atual de metais nobres como Au, Pt, nem a produção do fosfato necessário ao desenvolvimento da agricultura. Até mesmo grande parte da produção mundial de minério de ferro, necessário à produção de aço nos níveis de consumo atual, só se tornou possível nas últimas décadas com a utilização em larga escala do processo de flotação (Oliveira, 2007).

A importância da flotação como processo de concentração de minerais tem provocado o desenvolvimento e aprimoramento de máquinas de flotação, visando tornar essa operação cada vez mais eficiente no que se refere ao desempenho metalúrgico e à economia nos custos de capital e de operação.

Este fato faz com que sejam avaliadas as principais características de cada tipo de máquina de flotação para a escolha correta. Em alguns casos a escolha adequada dos equipamentos pode mudar significativamente o fluxograma do circuito e mesmo as condições operacionais e dosagem de reagentes, tornando o processo com melhor rendimento, mais seletivo ou de menor custo. Por outro lado, a escolha incorreta da máquina de flotação pode inviabilizar um processo (Guimarães e Peres, 1995).

Para que o processo de flotação apresente adequada seletividade e recuperação, é necessária a conjunção adequada de fatores físico-químicos e hidrodinâmicos. Enquanto os primeiros estão associados a características tecnológicas/mineralógicas do minério, à natureza e à dosagem dos reagentes, à qualidade da água e ao pH da suspensão, os fatores hidrodinâmicos estão relacionados com as células de flotação *per se* (coluna, mecânica ou pneumática), com a geometria e com as condições operacionais (vazão de polpa, vazão de ar, rotação do impelidor, distribuição dos tempos de residência, status da suspensão de sólidos). Quando se ajustam os fatores físico-químicos, as condições hidrodinâmicas passam a governar o desempenho do processo (Lima, 2009).

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O presente trabalho objetiva discorrer de maneira conceitual sobre a operação de concentração de minério de ferro por flotação, destacando a importância deste processo, realizando o levantamento dos principais equipamentos e como as variáveis operacionais influenciam esta operação unitária, levando em consideração as principais características dos equipamentos na separabilidade dinâmica.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Aspectos básicos da flotação

A flotação requer três condições básicas: liberação, diferenciação e separação dinâmica (Silva, 1973 apud Peres e Araújo, 2006). A liberação, quando não natural, pode ser obtida através dos processos de cominuição juntamente com as operações de separação por tamanho. A diferenciabilidade é a base da seletividade do método e a separabilidade dinâmica é a capacidade correlacionada aos tipos de equipamentos empregados.

A flotação é um processo que explora as diferenças nas propriedades de superfície dos minerais presentes na polpa. Para que ocorra a separação no processo são utilizados reagentes químicos que atuam sobre estas características de superfície, tornando alguns minerais hidrofóbicos e aumentando a hidrofiliabilidade de outros.

A seletividade baseia-se no fato de que a superfície das diferentes espécies minerais podem apresentar diferentes graus de afinidade química com a água, ou seja, a capacidade da superfície ser molhada. Esta capacidade também é conhecida como hidrofiliabilidade. Quanto menor for esta capacidade, mais hidrofóbica é a superfície do mineral.

Os compostos químicos se dividem em polares e apolares, em função de apresentarem ou não um dipolo permanente. A polarização ocorre na maioria dos minerais, sendo devido ao seu arranjo atômico que por sua vez é determinado pelo ângulo das ligações. Nos sistemas de flotação, a fase líquida é sempre a água, que é uma espécie polar. Já a fase gasosa é o ar, constituído basicamente por moléculas apolares.

Devido à polaridade, as moléculas de água, por exemplo, se organizam através da atração mantida entre pólos opostos entre moléculas distintas. Isso permite uma forte atração, denominada coesão molecular, que no estado líquido desta substância promove alta tensão superficial.

Contudo, a diferença na característica de superfície provoca a separação das espécies minerais presentes na polpa pela capacidade das partículas de se prenderem ou não às bolhas de ar. A propriedade diferenciadora pode ser induzida na promoção da separação das espécies minerais no processo de flotação.

Embora pareçam simples, os fenômenos que governam a flotação são complexos. Neles, a seletividade do processo está associada à química de superfície e à hidrodinâmica.

Química de superfície:

- Interações;
- Energia;
- Adsorção em interfaces;
- Molhabilidade natural de minerais;
- Uso de reagentes para tornar hidrofóbicas as superfícies minerais.

Na hidrodinâmica tem-se:

- Dispersão das bolhas de ar;
- Suspensão de sólidos;
- Colisão e adesão entre partículas minerais e bolhas de ar;
- Estabilidade do agregado partícula-bolha.

Outra variável importante na seletividade do processo de flotação é a distribuição de tamanhos das partículas.

3.2. Equipamentos de flotação

A separabilidade dinâmica é uma das condições básicas para a flotação e envolve a utilização de um equipamento que apresenta desempenho metalúrgico e capacidade adequados à realidade industrial (PERES et. al. 2010).

Atualmente existem basicamente quatro tipos de equipamentos disponíveis para a operação de flotação: as células convencionais, células tanque, colunas de flotação e as células pneumáticas. Qualquer equipamento se aplica para flotação tanto de finos quanto de grossos. Entretanto a coluna de flotação é mais recomendada para finos e menos recomendada para grossos.

O tempo de residência e a taxa de carregamento de rejeito são as variáveis que definem os equipamentos a serem adotados. Com isso as dimensões dos equipamentos de flotação variam de acordo com sua capacidade volumétrica, de 4 a 84m³ para as células convencionais, de 50 a 350m³ para as células tanque, de 150 a 220m³ para as colunas de flotação e de 2 a 83m³ para células pneumáticas. É importante observar que esta diferença é relativa à capacidade unitária, assim um circuito de flotação pode apresentar uma maior quantidade de células convencionais, comparado à aplicação de células tanque para processar o mesmo volume de polpa.

Para a operação de flotação os equipamentos precisam atender as seguintes características fundamentais:

- Manter as partículas minerais em suspensão;
- Gerar e dispersar as bolhas de ar;
- Manter e favorecer a mesma oportunidade de contato seletivo das partículas;
- Evitar a formação de espaço morto, o que reduz o tempo de residência;
- Transportar o mineral de interesse;
- Reduzir turbulência na interface polpa/espuma; e
- Permitir a drenagem da espuma.

Os tópicos a seguir descrevem os principais equipamentos de flotação utilizados atualmente.

3.2.1. Células convencionais

As células mecânicas foram as primeiras a serem desenvolvidas para utilização no processo de concentração de minérios por flotação. São equipamentos constituídos de dois componentes básicos: a célula e a máquina de flotação.

As células são tanques projetados para receber a polpa alimentada, continuamente, por uma das suas faces laterais e descarregá-la pelo lado oposto. Podem ser usadas células individualizadas, mas a regra é agrupar conjuntos de duas ou mais. Numa extremidade do conjunto é instalado um compartimento de alimentação e na extremidade oposta, um compartimento de descarga, a Figura 3.1 ilustra essa configuração. Estes compartimentos incluem alguns dispositivos para a regulagem do nível de polpa dentro das células (Chaves, et. al 2010).

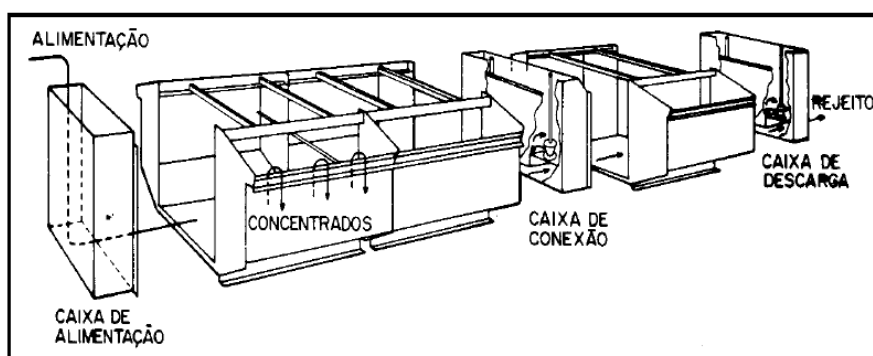


Figura 3.1 – Arranjo de células de flotação (Chaves, et. al 2010).

O material deprimido é arrastado pela corrente de água e sai pelo fundo da célula, passando para a célula seguinte e, finalmente, sendo descarregado pela caixa de descarga. Desta forma, há dois fluxos: um fluxo de afundado no sentido da caixa de alimentação para a caixa de descarga e outro de espuma, ascendente dentro das células e no sentido oposto ao do deprimido, através das calhas.

A máquina de flotação é instalada dentro da célula. Ela consiste de um rotor no fundo da célula, acionado e suspenso por um eixo. O rotor precisa fornecer a energia mecânica necessária para manter a polpa em suspensão. O conjunto tem um acionamento externo e, via de regra, o eixo gira dentro de um tubo que ultrapassa o nível da polpa e sai para a

atmosfera. 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, essa aspiração é suficiente para a flotação; em outros, prefere-se injetar ar (ou outro gás) comprimido para dentro da célula e ter o controle também sobre essa variável. A Figura 3.2 ilustra o equipamento.

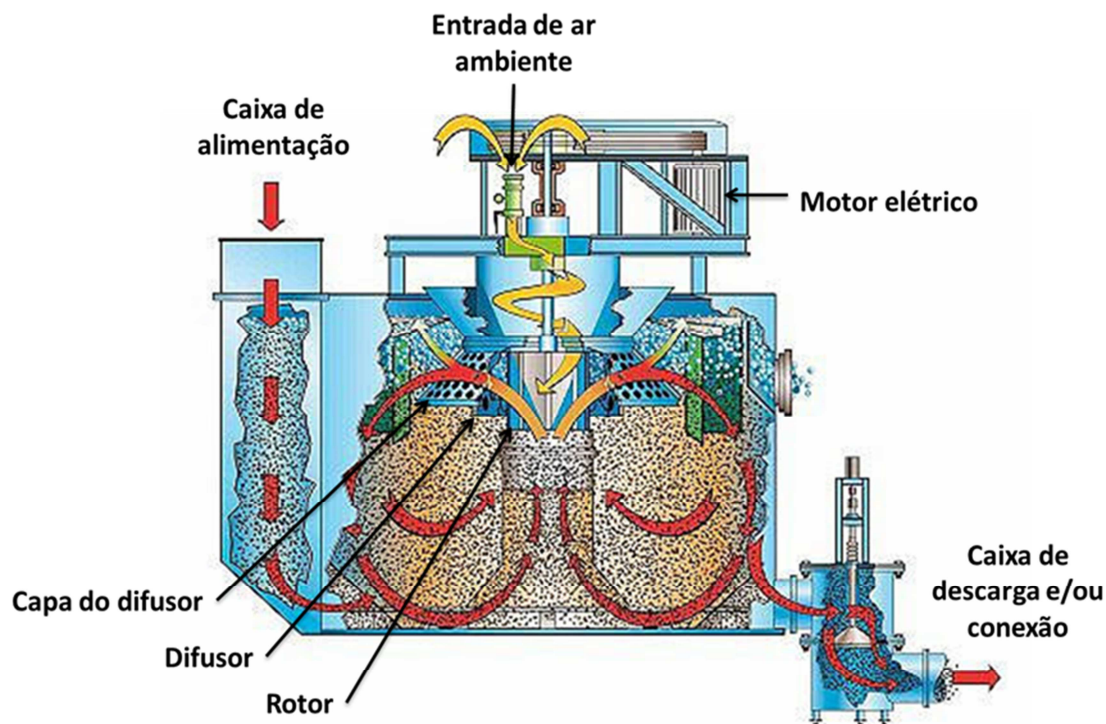


Figura 3.2- Representação esquemática da célula Wemco.

Alem de manter a polpa em suspensão, o rotor deve fornecer a energia necessária para o transporte do deprimido, o que é obtido pelo correto posicionamento do rotor dentro do volume da célula por uma rotação adequada e por uma escolha adequada do diâmetro (Chaves e Rodrigues, 2013).

Para que o ar seja efetivo para carrear para cima o maior número possível de partículas coletadas, deve se dispor de um grande número de bolhas de pequeno diâmetro. Isto é conseguido colocando, em torno do rotor, uma peça chamada difusor, que fragmenta as bolhas de ar. A Figura 3.3 mostra um conjunto rotor e difusor das células Wemco. A Figura 3.4 mostra detalhe do rotor das células Wemco igual ao mostrado na Figura 3.2 (Chaves, et. al 2010).



Figura 3.3- Conjunto rotor, difusor e capa do difusor das células Wemco.



Figura 3.4- Detalhe do rotor das células Wemco.

Uma célula de flotação mecânica requer a geração de três zonas hidrodinâmicas distintas para que o processo de flotação seja eficaz. A região próxima ao rotor compreende a região turbulenta necessária para suspensão de sólidos, dispersão de gás em bolhas e interação partícula-bolha para a recolha de minerais sobre a superfície das

bolhas. Acima da região turbulenta encontra-se a zona de repouso onde os agregados de partícula-bolha elevam-se em uma região relativamente menos turbulenta. Esta região também ajuda a reduzir o número de minerais de desinteresse que possam ter sido arrastados mecanicamente ou terem sido aprisionadas entre as bolhas. A região acima da zona de repouso é a zona de espuma, que serve como um passo adicional de limpeza e melhoria da qualidade do produto. As três zonas hidrodinâmicas em células de flotação mecânicas de aeração forçada estão representadas na Figura 3.5 (Gorain, 2000).

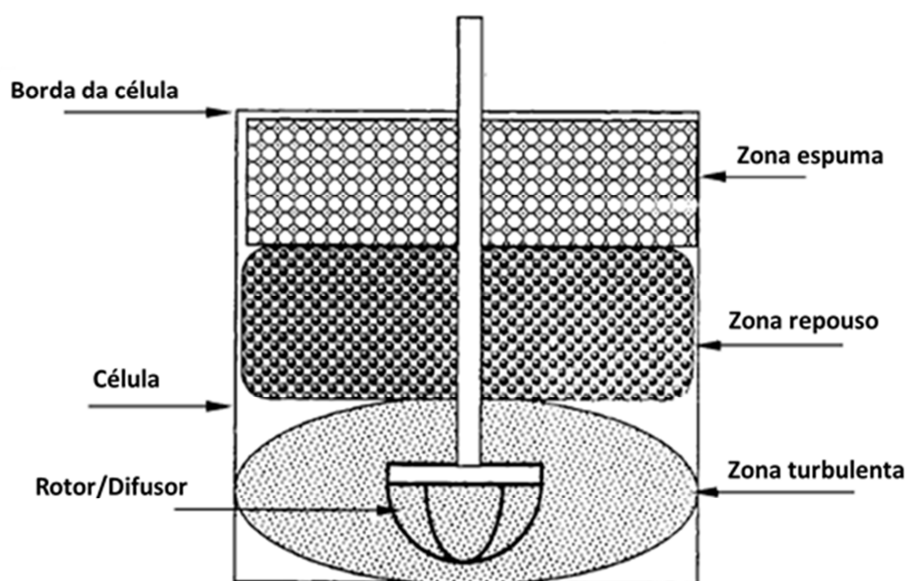


Figura 3.5 – Zonas hidrodinâmicos em uma célula de flotação mecânica de aeração forçada.

As células convencionais variam suas características operacionais em resposta ao tipo de sistema de aeração do equipamento. As células auto-aeradas permitem trabalhar com polpas com até 55% de sólidos em peso, sendo utilizadas válvulas guilhotina ou borboleta para controle da vazão de ar. Já as células de aeração forçada permitem um percentual de sólidos em peso de até 65% para minérios de alto peso específico.

Uma representação esquemática dos dois tipos principais de células de flotação mecânica é mostrada na Figura 3.6. Na célula de aeração forçada (Figura 3.6.a), o mecanismo de agitação é normalmente posicionado na parte inferior, mas, por vezes, no centro, da célula (Lelinski, 2005). Como mostrado na Figura 3.6.b, o mecanismo de agitação em células auto-aeradas está localizado perto da parte superior da célula. Para ambos os tipos de células, o conjunto rotor/difusor tem de ser concebido e instalado de

modo a permitir a recirculação da polpa através da zona do agitador, a fim de manter as partículas em suspensão e para proporcionar boas condições de interação bolha-partícula (Yianatos, 2007).

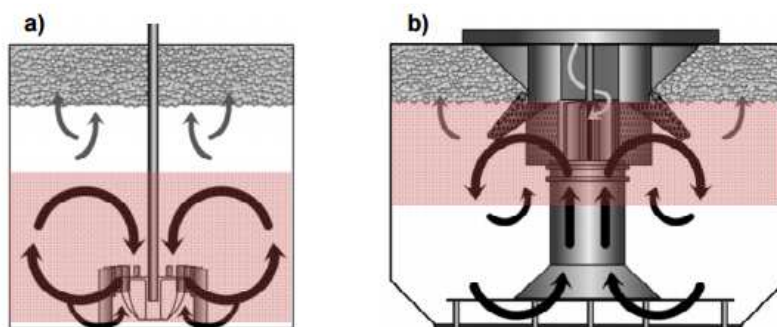


Figura 3.6 - Diagramas esquemáticos sistemas de aeração: aeração forçada (a) e auto-aerada (b) - zona vermelha - turbulência de alta intensidade (Yianatos, 2007).

As células de aeração forçada são aquelas em que o ar é injetado na região rotor/difusor por meio de compressor externo (Nelson, 2000). Ao atingir a região do rotor da célula, o ar sofre cisalhamento e conseqüente dispersão na forma de pequenas bolhas (Patwardhan e Joshi, 1999). Neste tipo de configuração, a rotação do rotor e a taxa de aeração (vazão de alimentação de ar) são independentes, ou seja, a mudança na magnitude de uma delas não afeta a outra. A Figura 3.7(a) ilustra um modelo de célula mecânica de flotação de aeração forçada, fabricadas pela FLSmidth.

As células autoeradas ou subaeradas são aquelas onde a injeção de ar é resultado do gradiente de pressão negativo na região do rotor da célula, promovido pelo giro do mesmo, quando essa depressão é suficientemente alta, ocorre sucção de ar da atmosfera para o interior do equipamento, não necessitando a utilização de compressor de ar no circuito (Patwardhan e Joshi, 1999). Diferentemente das células de aeração forçada, neste tipo de equipamento as variáveis rotação do rotor e taxa de aeração não são independentes, isto é, existe impossibilidade de variação de uma delas sem que isso não acarrete uma mudança na outra. Células mecânicas de flotação subaeradas são as mais utilizadas no tratamento de minérios em todo o mundo (Arbiter, 1999). A Figura 3.7(b) ilustra um modelo de célula mecânica de flotação de aeração forçada, fabricadas pela FLSmidth.

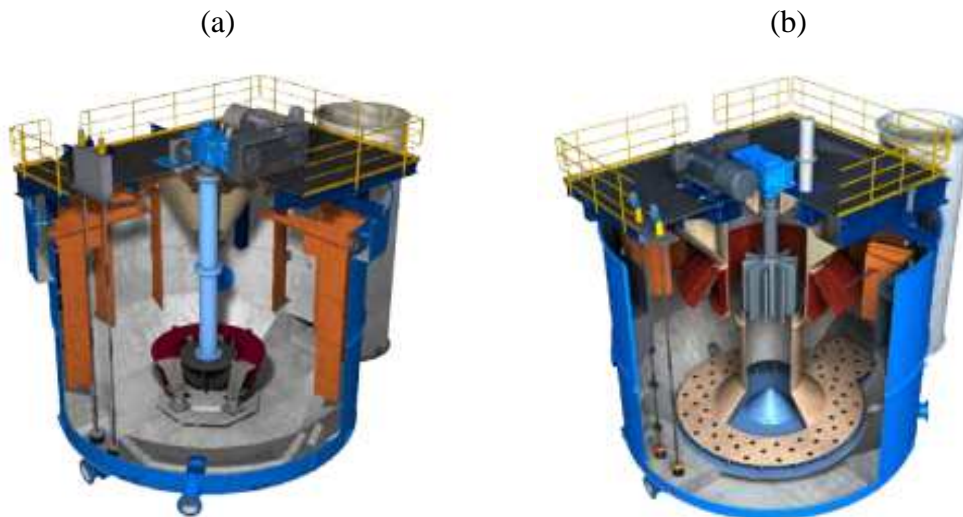


Figura 3.7 - Exemplo de células mecânicas de flotação FLSmidth: aeração forçada (a) e auto-aerada (b).

A grande diferença entre estes dois mecanismos reside no sentido do fluxo interno da polpa no interior das células, adicionalmente a célula com aeração forçada permite melhor controle da vazão do ar.

A escolha do equipamento leva em consideração aspectos econômicos, assim como facilidade de assistência técnica e manutenção. Segundo Wills (2006) os principais critérios para avaliar o desempenho de células de flotação são:

- desempenho metalúrgico (recuperação e teor);
- capacidade, expressa em toneladas tratadas por unidade de volume;
- aspectos relacionados aos custos de aquisição, operacionais e de manutenção.

3.2.2. Células tanques

As células tanque utilizam a tecnologia de agitadores e condicionadores para promover a agitação e o bombeamento da polpa. Os tanques são circulares e, dependendo do modelo, o conjunto rotor-estator é colocado a diferentes alturas (Chaves e Rodrigues, 2013):

- Para operações rougher ou scavenger, ele é colocado mais acima dentro da célula, de modo a forçar o escoamento para o flotado;
- Para operações cleaner, ele é colocado embaixo, de modo que o conjunto bolha-partículas permaneça estável.

As células tanque possuem um arranjo que permite desenvolver equipamentos com alta capacidade volumétrica e permite trabalhar com polpa com até 65% de sólidos em peso. Seu desempenho e funcionalidade são compatíveis com as células de flotação convencionais. São necessários sopradores para este tipo de equipamentos e normalmente são adotados um por linha e um reserva, não devendo ser locados sob os equipamentos de flotação de forma a evitar transbordo de polpa sobre os mesmos. A figura 3.8 ilustra o equipamento.



Figura 3.8 – Célula tanque: desenho esquemático modelo RCS da Metso.

O tamanho e a quantidade de bolhas dependem, entre outros fatores, do tipo e dosagem de reagentes, da vazão e pressão do ar e da velocidade periférica do rotor (para as auto-aeradas). Esta velocidade é normalmente dada em rotações por minuto, mas o mais importante é a velocidade periférica, tanto para a sua capacidade de suspensão como para a aeração. Adota-se o valor de 1.250rpm para ambos os tipos de equipamentos: convencionais e tanque.

Tanto para as células convencionais quanto as células tanque é importante adotar duas válvulas na saída de cada banco. Preferencialmente elas devem ser cônicas para possibilitar melhor ajuste de vazão. Além disso, para os equipamentos do tipo convencional, deve-se adotar uma caixa de passagem a cada 5 células para evitar sedimentação da polpa. No caso de células tanque deve-se adotar um desnível entre elas de 840 mm.

O tipo de calha para transbordo varia em função da viscosidade da espuma. Em casos em que a espuma é fluida, não é necessária pás para auxiliar o seu transbordo. Há casos de uso de spray de água para elevar a fluidez da camada de espuma. Em caso de grande quantidade de massa transbordada ou grandes distâncias até o transbordo, utilizam-se calhas internas, cujo objetivo é evitar a descoleta e aumentar a recuperação da camada de espuma. A figura a 3.9 ilustra ambos os sistemas.

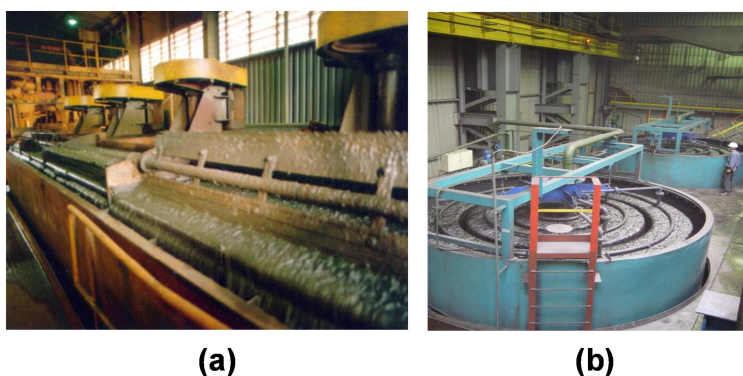


Figura 3.9 - Calha de transbordo: escumadeiras (a) e internas (b).

3.2.3. Colunas de flotação

Nas unidades industriais de flotação em coluna instaladas no Brasil vem sendo utilizada somente a concepção da coluna convencional, tipo canadense. Na Figura 3.10 está apresentado um desenho esquemático desse equipamento, com ênfase nos seus aspectos mais importantes para o processo.

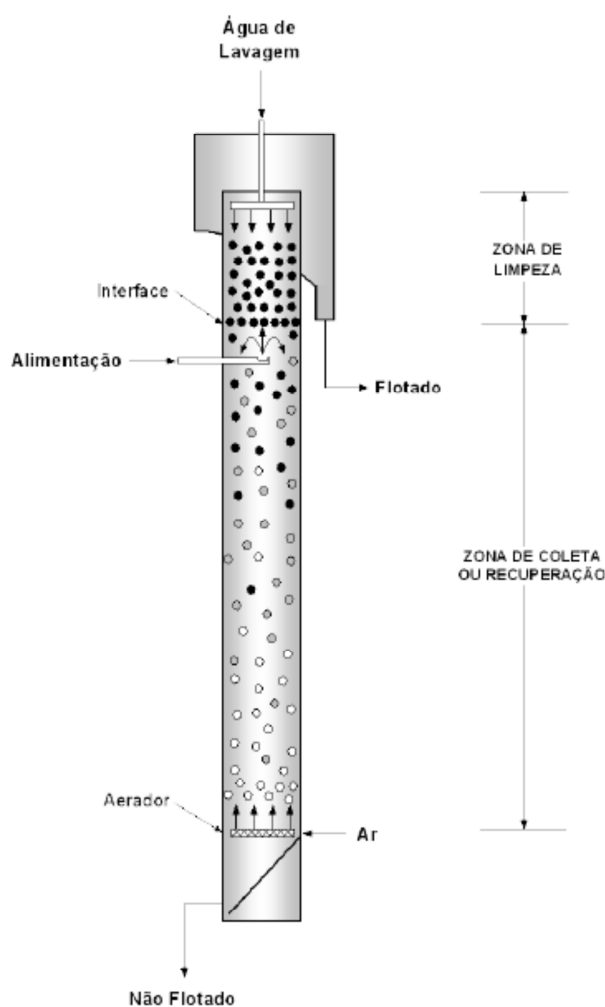


Figura 3.10 – Esquema básico de uma coluna de flotação (Aquino et. al 2010).

A coluna convencional de flotação apresenta características diferentes da célula mecânica principalmente no que se refere à capacidade de geração de bolhas pequenas, às condições hidrodinâmicas de baixa turbulência e à possibilidade de eliminação do material hidrofílico arrastado para a espuma através da adição de água de lavagem. Nesse contexto, a coluna difere da célula mecânica em quatro aspectos básicos:

- geometria (relação altura/diâmetro elevada);
- presença de água de lavagem;
- ausência de agitação mecânica;
- sistema de geração de bolhas.

Essas características diferentes da coluna com relação à célula mecânica têm permitido a obtenção de resultados melhores na coluna convencional, principalmente, na flotação de material com granulometria fina e na etapa de limpeza. A coluna é constituída das seções de recuperação e limpeza (Oliveira e Luz, 2003).

O funcionamento das colunas de flotação consiste na alimentação da polpa de minério no terço superior da coluna, enquanto o ar é injetado na parte inferior. Isto provoca um fluxo contra corrente das bolhas de ar em sentido ascendente com a polpa em sentido contrário. A região da coluna onde ocorre o contato entre bolhas de ar e partículas de sólido é chamada Zona de Coleta.

As bolhas carregadas seguem o fluxo ascendente e se acumulam na parte superior da coluna formando uma camada de espuma chamada de Zona de Limpeza. A espessura dessa camada é variável, contudo sempre é necessário que ela exista porque traz estabilidade para as bolhas, evitando que elas estourem antes que sejam conduzidas para as calhas de rejeito.

A polpa contendo o concentrado segue o fluxo descendente em direção à base das colunas e escoar pelo tubo de underflow. Nesta tubulação está instalada uma válvula responsável pelo controle da espessura da camada de espuma. A figura 3.11 ilustra o exposto.

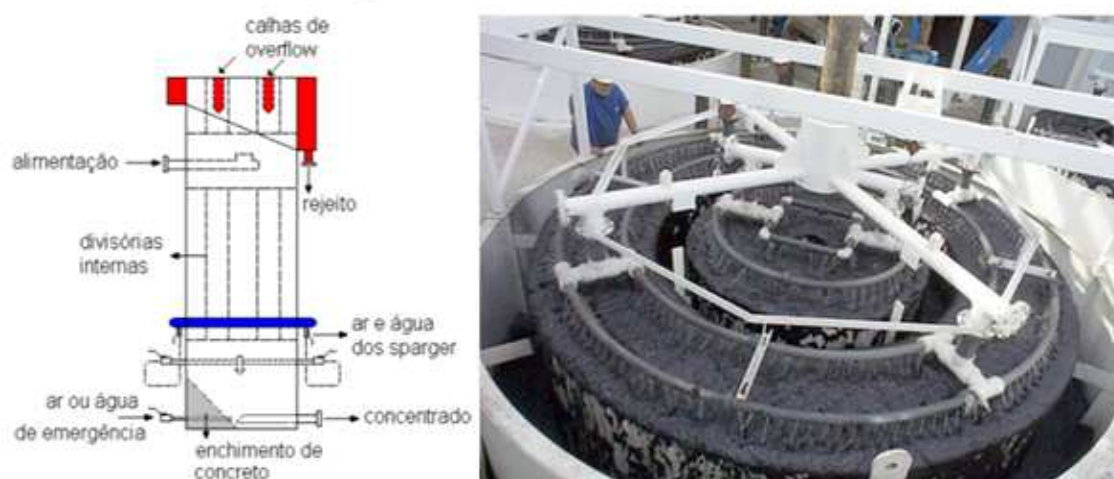


Figura 3.111 - Coluna: diagrama esquemático e foto.

Dependendo da dimensão, na superfície da coluna pode existir calhas internas ligadas a calha de transbordo periférica. Estas calhas, com inclinação do centro para a periferia, possibilitam a coleta da espuma sem ser necessário percorrer toda a trajetória de um raio. Quanto menor for a trajetória da bolha na superfície da coluna menor a chance dela se romper e contaminar o concentrado.

O sistema aspersor é responsável pelo borbulhamento no processo de flotação em coluna, e consiste de um manifold (sistema de tubulações com várias válvulas) que recebe água e ar e distribui para o sistema de aeração. O ar entra no manifold em um ponto e a água em outro e saem juntos pelo sparger (borbulhador). Este fluxo misturado é injetado na coluna a alta velocidade.

Os primeiros borbulhadores (aeradores) eram simples placas porosas, de metal sinterizado, borracha perfurada ou pano de filtro. Já os da segunda geração são os sparjets, que combinam água e ar pressurizado. A água funciona como redutor do diâmetro do orifício, originando bolhas menores. Possuem alto desempenho, porém requerem alta manutenção dos orifícios. A figura 3.12 ilustra estes modelos.

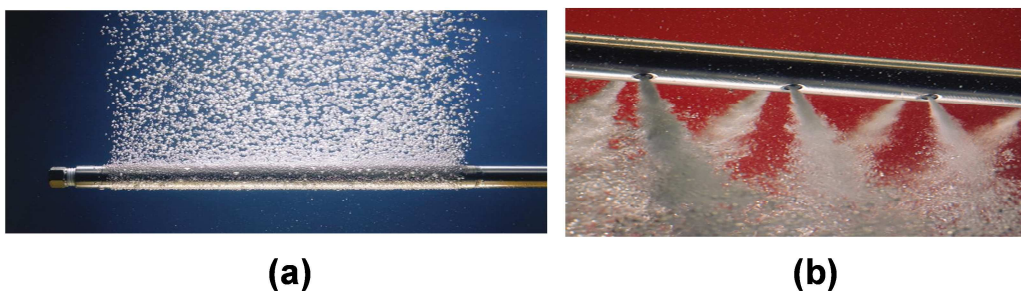


Figura 3.12 - Borbulhador de placa porosa (a) e borbulhador de água e ar pressurizado - sparjets (b).

Os borbulhadores da terceira geração também misturam água e ar sob pressão e são chamados SlamJets e são ilustrados na figura 3.13. Possuem alta capacidade de aeração e dispersão das bolhas e assim produzindo bolhas maiores. Além disso, apresentam baixo consumo energético e manutenção

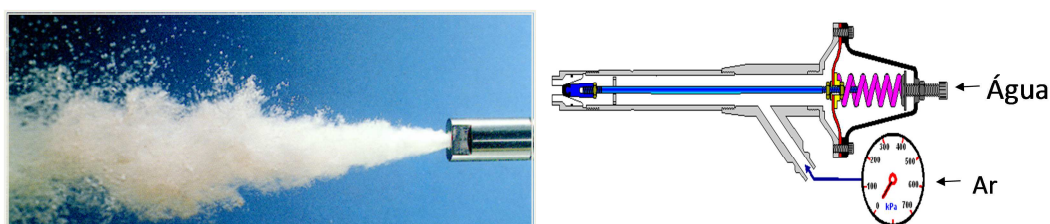


Figura 3.132 - Borbulhador de água e ar pressurizado da terceira geração.

Outro modelo de borbulhador é o Microcel© ou retrofit apresentado na figura 3.14. Neste borbulhador se recircula parte do afundado (cerca de 10%) juntamente com o ar nos spargers, que são misturadores fixos. As bolhas são menores, com isso há uma redução de entupimento e o material afundado tem uma nova oportunidade de ser coletado. É um equipamento altamente robusto. Em contrapartida, há a necessidade de uma bomba de alta potência com inversor de frequência.

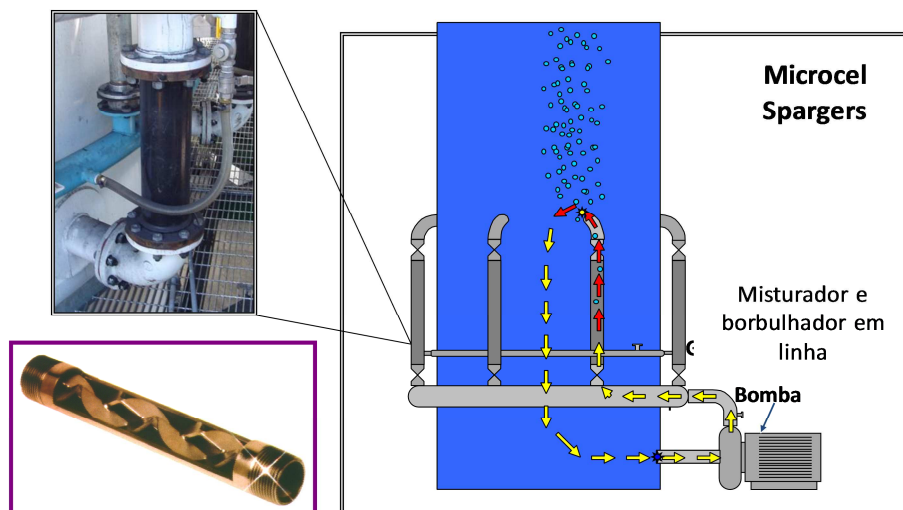


Figura 3.14 - Diagrama esquemático do borbulhador Microcel©.

Alguns novos projetos estão adotando o sistema retrofit devido à facilidade de manutenção. Para circuitos existentes a decisão de seleção destes borbulhadores se define apenas pelo seu custo. Os compressores não devem ser locados muito próximos aos equipamentos de flotação de forma a evitar transbordo de polpa sobre os mesmos.

As principais variáveis de projeto da coluna que influenciam no processo de concentração por flotação são:

- vazão de ar;
- água de lavagem;
- hold up do ar;
- altura da camada de espuma;
- tamanho de bolhas;
- altura da seção de recuperação;
- bias;
- tempo de residência.

Estas variáveis podem ter efeito significativo sobre o teor e/ou a recuperação do mineral de interesse e, como seus efeitos podem estar inter-relacionados, dificilmente serão avaliados isoladamente (Aquino et. al 2010).

3.2.4. Célula pneumática

Nas células pneumáticas os mecanismos de colisão e adesão entre partículas e bolhas ocorrem externamente à célula com elevada eficiência, e, com isso, não há necessidade de elevados tempos de residência. Além disso, o equipamento proporciona baixa turbulência (o que reduz a probabilidade de descoleta), baixo arraste de partículas ultrafinas para a espuma e, devido a injeção de polpa sob pressão que promove a sucção do ar, a geração de bolhas de pequeno diâmetro. A figura 3.15 ilustra o equipamento.

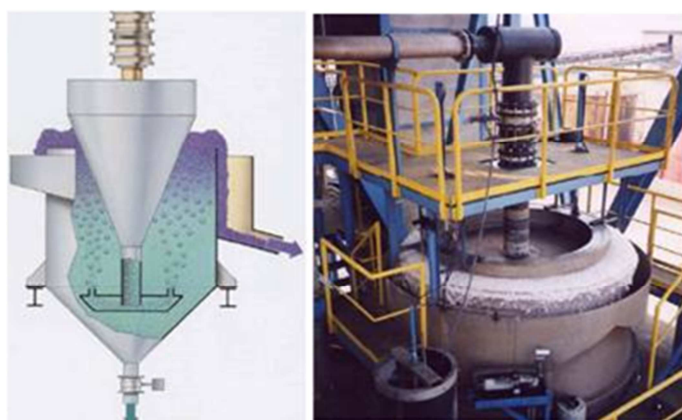


Figura 3.15 - Célula pneumática: diagrama esquemático e foto.

Os misturadores de cerâmica são responsáveis por promover a colisão e adesão entre as partículas minerais e as bolhas de ar. A figura 3.16 apresenta as partes do equipamento.



Figura 3.16 - Detalhes da célula pneumática.

Por se tratar de um equipamento sem partes móveis e pelo baixo tempo de residência das partículas, as células pneumáticas são equipamentos de tamanho reduzido (se comparadas às células convencionais e colunas de flotação) e os gastos com infraestrutura é inferior ao dos outros equipamentos.

A eficiência da flotação é determinada pela série de probabilidades que contempla a probabilidade do contato entre a partícula e a bolha, a probabilidade de adesão, a probabilidade do transporte entre a polpa e a espuma e a probabilidade da coleta. Na flotação pneumática, a probabilidade de adesão partícula-bolha é bastante elevada. Isto se deve ao intenso contato bolha-partícula no sistema de aeração, que além de favorecer a turbulência necessária para favorecer o encontro da partícula com a bolha, trabalha de forma a reduzir o diâmetro de bolha, oferecendo maior superfície de contato e favorecendo a adesão, logo sua probabilidade é superior aos sistemas de flotação convencional (célula e coluna).

Atualmente no mercado existem diferentes designs para células pneumáticas e todas usufruem da maior probabilidade da adesão partícula-bolha pelo fato da polpa ser aerada antes de entrar na célula.

A célula pneumática Pneufлот® fornecida pela empresa MBE e a célula vertical Imhofлот® tem seus esquemas básicos ilustrados na Figura 3.17. Em ambas, a agitação é feita pelo movimento do ar injetado que sai do injetor no fundo da célula.

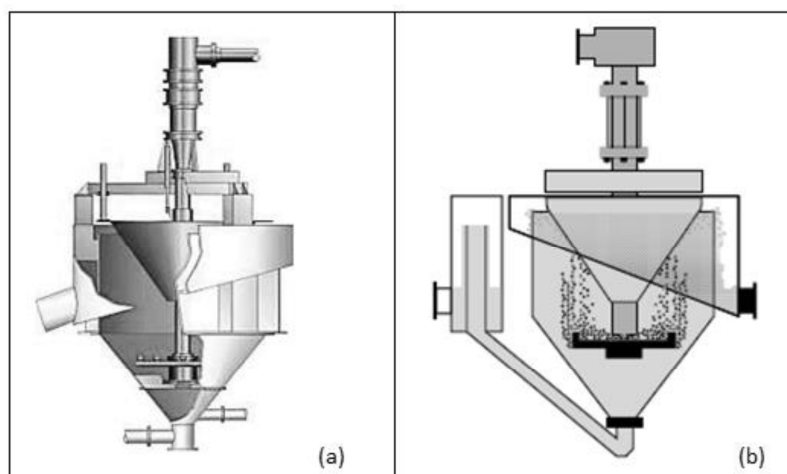


Figura 3.17 - Esquema básico das células pneumáticas Imhofлот® (a) e Pneufлот®(b)

(www.maelgwyn.com e www.mbe-cmt.com)

Outra célula presente no mercado é a Célula-G Imhoflot®, em que as forças centrífugas são usadas na célula para separar rapidamente as fases após coleta do minério e, conseqüentemente, reduzindo consideravelmente o tamanho dos tanques de depósito necessários. A Figura 3.18 ilustra o modelo da célula G-Cell.

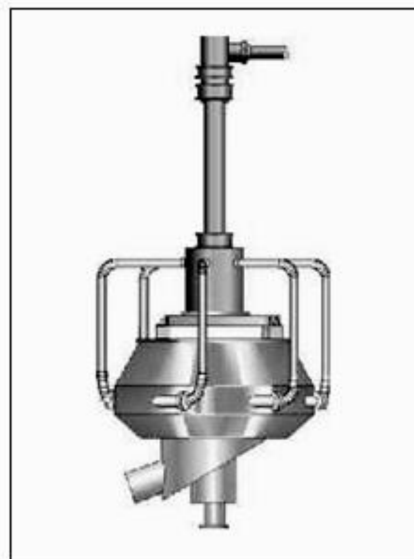


Figura 3.18 - Esquema básico da célula G-Cell (www.maelgwyn.com)

A tecnologia das células de flotação pneumática se caracteriza por:

- Eficiência na recuperação de partículas pequenas e grossas onde a flotação em célula se revela ineficaz;
- Células de tamanho reduzido e, conseqüentemente, menor espaço necessário para implantação da unidade de flotação;
- Menor consumo energético por não ser necessária a utilização de rotor para manter a polpa em suspensão;
- Menor turbulência, pela ausência de partes mecânicas;
- Favorecimento de partículas grosseiras se comparada com as células convencionais;
- Ampla faixa de distribuição granulométrica na polpa;
- Baixo tempo de residência.

4. CONCLUSÕES

Analisando o cenário atual de grandes avanços tecnológicos, é possível notar cada vez mais o envolvimento de grandes empresas no desenvolvimento e aperfeiçoamento das máquinas de flotação. Nas usinas de beneficiamento de minério de ferro, por exemplo, em operação a mais tempo, pode se perceber o quão importante foi ou é a utilização das células mecânicas convencionais. Assim também percebemos como as colunas puderam contribuir para o aumento da produção mineral, tendo como sua principal característica a capacidade de tratar granulometrias mais finas, que antes seriam rejeitadas, além de hoje ser fundamental no tratamento de minérios de baixo teor.

Em contrapartida, no desenvolvimento de novos projetos, nota-se a busca por redução do número de equipamentos no processo de flotação, principalmente no que se trata de partículas mais grosseiras, assim sendo pode-se avaliar que as células tanques têm contribuído de forma gradativa para que isso aconteça, proporcionando o aumento na capacidade de tratamento em um único equipamento, reduzindo os custos e tempo com manutenção em relação as células convencionais.

Mas como estamos num mundo globalizado e cada vez mais competitivo, percebe-se a busca pela afirmação de alguns equipamentos que antes pareciam não ter espaço no mercado nacional, mas hoje já começam a fazer parte de uma realidade como é o caso da célula pneumática que surge com propostas inovadoras de tratamento de minérios, tendo como principais pontos positivos alegado pelos seus fabricantes, a capacidade de tratamento de partículas finas e grossas, menor tempo de residência e menor consumo energético.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, J. A.; OLIVEIRA, M. L. M.; FERNANDES, M. D. **Flotação em coluna**. In: LUZ, A. B. et al, Tratamento de Minérios, 5ª ed. CETEM, Cap.12, 2010.

ARBITER, Nathaniel. Development and scale-up of large flotation cells. **Advances in Flotation Technology**, p. 345-53, 1999.

CHAVES, A. P.; RODRIGUES, W, J. **Máquinas de flotação**. In: CHAVES, A. P., Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – A Flotação no Brasil, 3ª ed., Vol. 4, Cap.2, p. 40-64, São Paulo: Oficina de Textos, 2013

CHAVES, Arthur Pinto; DE SALLES LEAL FILHO, Laurindo; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Processos Mineraiis–COPM. 2010.

GORAIN, B. K.; FRANZIDIS, J. P.; MANLAPIG, E. V. Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles. 2000.

GUIMARAES, R. C.; PERES, A. E. C. Máquinas de flotação. **Relatório Técnico BT/PMI/046, Escola Politécnica DEM-USP**, 1995.

LELINSKI, D.; REDDEN, L. D.; NELSON, M. G. Important considerations in the design of mechanical flotation machines. In: **Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, Australia**. 2005. p. 217-223.

LIMA, Odair Alves. **Suspensão de partículas grossas em células mecânicas de flotação**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NELSON, M. G. Hydrodynamic design of self-aerating flotation machines (vol 13, pg 991, 2000). **MINERALS ENGINEERING**, v. 13, n. 13, p. 1429-1430, 2000.

OLIVEIRA, José Farias. 1. BREVE APRESENTAÇÃO DO ESTADO DA ARTE. **Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral**, p. 133, 2007.

OLIVEIRA, M. L. M.; DE AQUINO, J. A. Aspectos relevantes das colunas de flotação. **HOLOS**, v. 1, p. 44-52, 2006.

OLIVEIRA, M. L.M., LUZ, J. A. M. **Flotação aplicada ao processamento de minério fosfático**. Apostila dos professores do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Araxá, 2003.

PATWARDHAN, Ashwin W.; JOSHI, Jyeshtharaj B. Design of gas-inducing reactors. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 38, n. 1, p. 49-80, 1999.

PERES, A. E. C., CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios; Britagem, Peneiramento e Moagem**. 3.ed. São Paulo: Signus, 2010. 258p.

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A. C. **A flotação como operação unitária no tratamento de minérios**. In: CHAVES, A. P., Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Flotação o Estado da Arte no Brasil, 1ª ed., Vol. 4, Cap.1, p. 1-29, 2006.

WILLS, B. A. *et al.* **Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 7. ed. Butterworth-Heinemann, 2006.

www.maelgwyn.com - Disponível em FLOTAÇÃO PNEUMÁTICA – IMHOFLOT™. Acesso em 02/02/2015.

www.mbe-cmt.com - Disponível em PNEUMATIC FLOTATION MACHINE. Acesso em 02/02/2015.

YIANATOS, J. B. Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes: Columns and mechanically agitated cells—A review. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 85, n. 12, p. 1591-1603, 2007.