

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

CONVÊNIO CETEM/ USP

**FLOTAÇÃO EM COLUNA - ESTADO DA ARTE**

JULIO CESAR GUEDES CORREIA

ORIENTADOR: Prof.Dr. Laurindo S. Leal Filho

1995

SÃO PAULO

Biblioteca da Escola Politécnica  
Universidade de São Paulo

**JULIO CESAR GUEDES CORREIA**

**FLOTAÇÃO EM COLUNA - ESTADO DA ARTE**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo visando o título de Mestre em  
Engenharia Mineral

1995

SÃO PAULO

À minha esposa Cristina e filha Juliana pelas muitas horas que tiveram  
que me dividir com este trabalho e a minha mãe Maria da Luz e meu pai  
Julio Correia "in memorian", pois sem eles nada seria possível para mim.

## AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Laurindo Leal S. Filho pelas seguras orientações e grande incentivo e ao Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves por algumas sugestões.

Ao Diretor do CETEM, Prof. Dr. Roberto C. Villas Bôas e aos Profs. Drs. da EPUSP, Eduardo Camilher Damasceno e Arthur Pinto Chaves pelo grande empenho para a realização do Curso em Engenharia Mineral (CETEM/EPUSP), que proporcionou excelente aperfeiçoamento aos pesquisadores do CETEM.

A desenhista Sueli de Souza Mattos da Silveira pela confecção dos desenhos.

Ao Eng. Paulo Fernando A. Braga pelo seu auxílio na parte de editoração e confecção de gráficos.

A todos que, direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

## ÍNDICE

Página

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE FIGURAS**

**SÍMBOLOS E UNIDADES**

**RESUMO**

**ABSTRACT**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>6</b>
<b>3. ADVENTO HISTÓRICO E EVOLUTIVO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA</b>	<b>7</b>
<b>4. ASPECTOS ESTRUTURAIS E DE FUNCIONAMENTO DE COLUNAS DE FLOTAÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>5. BALANÇO DE MASSAS E VOLUME EM UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>6. VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO</b>	<b>30</b>
6.1. Fluxo de Gás (ou Ar)	<b>31</b>
6.2. Água de Lavagem	<b>34</b>
6.3. Altura da Espuma	<b>37</b>
6.4. Tempo de Residência	<b>38</b>
6.5. Altura da Coluna	<b>39</b>
6.6. Bias	<b>40</b>
6.7. "Hold up"	<b>41</b>
6.8. Percentagem de sólidos	<b>49</b>

6.9. Tamanho da Bolha	49
<b>7. EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM OS PRINCÍPIOS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO</b>	<b>61</b>
7.1. Célula Jameson	61
7.2. Coluna Empacotada ("Packed Column Flotation")	67
7.3. Coluna Flotaire	70
7.4. Microcell	77
7.5. Outros Equipamentos	82
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>90</b>

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1</b> - Condições típicas de operação e desenho em células de coluna de flotação.	30
<b>Tabela 2</b> - Características de alguns materiais constituintes de aeradores.	54
<b>Tabela 3</b> - Resultados de "scale-up" da flotação de taconito não magnético (comparação entre célula convencional e de coluna empacotada).	69
<b>Tabela 4</b> - Diferenças entre os dois principais tipos de equipamentos de coluna Flotaire.	70
<b>Tabela 5</b> - Comparação dos resultados metalúrgicos entre a célula Flotaire e a célula mecânica.	75
<b>Tabela 6</b> - Comparação de resultados entre a coluna Flotaire e células mecânicas para o estágio "scavenger" do minério sulfetado de cobre da região do Arizona e Novo México (E.U.A.).	76
<b>Tabela 7</b> - Comparação entre o circuito Flotaire e o circuito de células mecânicas ( "rougher" e "cleaner" ), para o minério de molibdênio de Utah (E.U.A.).	77

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1</b> - Coluna de flotação convencional.	21
<b>Figura 2</b> - Balanço do "BIAS" positivo ( "BIAS"> 0 ).	28
<b>Figura 3</b> - Estimativa de água de lavagem.	37
<b>Figura 4</b> - Métodos de medição de "Hold-up".	42
<b>Figura 5</b> - Medição de gás "Hold-up" por diferença de pressão.	44
<b>Figura 6</b> - Gás "hold-up" real x Gás "hold-up" aparente utilizando manômetros de água.	47
<b>Figura 7</b> - Sistema esquemático da câmara de mistura (ar-água) pressurizada, no sistema externo de geração de bolhas desenvolvido pelo U.S.B.M.	57
<b>Figura 8</b> - Célula Jameson.	63
<b>Figura 9</b> - Coluna Empacotada ( "Packed Column").	68
<b>Figura 10</b> - Coluna Flotaire.	73
<b>Figura 11</b> - Coluna Microcell.	79
<b>Figura 12</b> - Representação esquemática do gerador de microbolhas da coluna Microcell.	81
<b>Figura 13</b> - Célula EKOF.	85

## SÍMBOLOS E UNIDADES

- A - área superficial ( $m^2$ )
- Ac - área transversal da coluna ( $cm^2$ )
- a - longitude de aresta (m)
- C - concentrado da coluna (kg/h)
- D - diâmetro da coluna (m)
- Deq - diâmetro equivalente da coluna (m)
- db - tamanho médio da bolha (mm)
- F - alimentação da polpa da coluna (kg/h)
- g - aceleração da gravidade ( $m^2/s$ )
- H - altura total da coluna de flotação (m)
- H<sub>1</sub> - altura da zona de recuperação da coluna de flotação (m)
- He - altura da espuma (m)
- Jb - velocidade superficial de BIAS (cm/s)
- Jc - velocidade superficial do concentrado (cm/s)
- Jg - velocidade superficial do gás (ou ar) (cm/s)
- Jg\* - velocidade superficial do gás (ou ar) na CNTP (cm/s)
- Jp - velocidade superficial da polpa de alimentação (cm/s)
- Jw - velocidade superficial da água de lavagem (cm/s)
- L - comprimento (m)
- Pc - pressão absoluta no topo da coluna (KPa)
- Pt - pressão absoluta no fundo da coluna (KPa)
- Qc - vazão de concentrado ( $m^3/h$ )
- Qcl - vazão de líquido no concentrado ( $m^3/h$ )

$Q_{cs}$  - vazão de sólido no concentrado ( $m^3/h$ )  
 $Q_f$  - vazão de alimentação ( $m^3/h$ )  
 $Q_{fl}$  - vazão de líquido na alimentação ( $m^3/h$ )  
 $Q_{fs}$  - vazão de sólido na alimentação ( $m^3/h$ )  
 $Q_t$  - vazão de rejeito ( $m^3/h$ )  
 $Q_{tl}$  - vazão de líquido no rejeito ( $m^3/h$ )  
 $Q_{ts}$  - vazão de sólido no rejeito ( $m^3/h$ )  
 $Q_{ww}$  - vazão de água de lavagem ( $m^3/h$ )  
 $Q_{wwc}$  - vazão de água de lavagem no concentrado ( $m^3/h$ )  
 $Q_{wwt}$  - vazão de água de lavagem no rejeito ( $m^3/h$ )  
 $T$  - rejeito da coluna ( $kg/h$ )  
 $U_I$  - velocidade intersticial do líquido ( $m/s$ )  
 $U_p$  - velocidade de sedimentação das partículas ( $m/s$ )  
 $V$  - volume ( $m^3$ )  
 $W$  - quantidade de água de lavagem ( $l/min$ )  
 $\epsilon_{ap}$  - gás "hold-up" aparente ( $^{\circ}/1$ )  
 $\epsilon_c$  - gás "hold-up" do concentrado ( $^{\circ}/1$ )  
 $\epsilon_{ga}$  - gás "hold-up" no ponto A ( $^{\circ}/1$ )  
 $\epsilon_{gb}$  - gás "hold-up" no ponto B ( $^{\circ}/1$ )  
 $\rho_s$  - densidade do sólido ( $g/cm^3$ )  
 $\rho_{sl}$  - densidade da polpa ( $g/cm^3$ )  
 $\tau$  - tempo médio de residência do líquido (min)  
 $\tau_p$  - tempo médio de residência das partículas (min)

## RESUMO

Este trabalho apresenta o "estado da arte" da flotação em coluna, cujos princípios se baseiam nos da flotação convencional. A flotação em coluna é um processo que vem sendo efetivamente utilizado na prática industrial há apenas 15 anos, constituindo-se assim, num vasto campo para pesquisas, como exemplo, pode ser citado o grande número de novas variantes de colunas de flotação que surgiram no mundo nos últimos 10 anos.

## ABSTRACT

This study presents the state of art of column flotation whose principles are based on conventional flotation. The process of flotation in columns has been utilized in the industry for only 15 years. Therefore a lot of research is needed in this field. In the last ten years, diferent column designs were introduced for flotation purposes.

## 1. INTRODUÇÃO

A flotação em coluna já é conhecida desde o início dos anos 60, quando se tomou conhecimento de sua existência através dos trabalhos de BOUTIN; WHEELER<sup>(1)</sup>, cujos princípios e mecanismos peculiares de funcionamento, assim como o "design" inovador para a época chamaram bastante atenção da comunidade técnico-científica mundial, mas provocaram certo ceticismo junto às empresas mineradoras. Talvez tenha sido esta a causa maior para que tal inovação não fosse prontamente colocada em funcionamento e tivesse seu uso mais difundido dentro da indústria mineral.

No início da década de 80, todavia, a flotação em coluna ganhou sua primeira aplicação industrial<sup>(2)</sup> e desde então tem sido alvo de atenção de inúmeros pesquisadores que muito têm contribuído para difusão e aplicação da nova tecnologia em vários segmentos da indústria mineral em todos os continentes. Pode-se hoje dizer que existe uma tendência cada vez maior de se substituírem as tradicionais células de flotação mecânicas por uma nova geração de células de flotação que utilizam os princípios básicos da flotação em coluna. As vantagens<sup>(3,4,5)</sup> oferecidas por esta nova geração de células são:

- i) A coluna possui uma menor área superficial ( $A$ )( $m^2$ ), menor relação área/ volume ( $A/V$ )( $m^2/ m^3$ ) e maior comprimento específico da seção de descarga do concentrado ( $L/V$ )( $m/ m^3$ ) do que a célula convencional. Com isso, uma única coluna pode substituir , com pelo menos idêntica eficiência metalúrgica, uma série de células

mecânicas convencionais, ocupando menor espaço nas usinas de concentração;

- ii) A flotação em coluna permite que as variáveis operacionais do processo de flotação sejam mais facilmente mensuráveis "on-line", oferecendo ainda a possibilidade de controle do processo através de facilidades computacionais e técnicas de automação;
- iii) A flotação em coluna dispensa o sistema rotor/impeler, além de suprimir o uso das espumadeiras para coleta da espuma mineralizada. Tal ausência de partes móveis leva a uma economia de energia acompanhada de uma diminuição do desgaste das partes móveis e necessidade freqüente de lubrificação e reposição;
- iv) A célula de coluna pode dispensar o uso de etapas "cleaner", simplificando o fluxograma do processo.
- v) Uma maior seletividade na separação entre o mineral-minério e os de ganga pode ser obtida ( sem prejuízo da recuperação ) através do uso da coluna de flotação. Isto se deve ao fato do equipamento oferecer possibilidade de controle das variáveis água de lavagem e espessura da camada de espuma sem necessidade de se alterar substancialmente o nível de polpa na célula e o tempo de flotação;
- vi) A coluna oferece possibilidade de maior recuperação de partículas finas devido à menor ocorrência de turbulência na zona de

recuperação. A ausência de agitação mecânica com o intuito de se manter os sólidos em suspensão parece influenciar positivamente nesse sentido;

vii) Maior capacidade de flotação em relação às células convencionais, devido à possibilidade de se processar polpas com maiores percentagens de sólidos e também ao fato de partículas flotarem mais rapidamente na coluna;

viii) Maior probabilidade de contato entre bolhas de ar e partículas minerais devido ao fato do fluxo de ar ser injetado em contra-corrente.

No que concerne a desvantagens da coluna perante a célula convencional, podemos citar as seguintes<sup>(5)</sup>:

i) Na coluna não se obtêm bons resultados na flotação de partículas grosseiras de alta densidade, pois estas, mesmo tendo sido previamente coletadas pelo fluxo de bolhas de ar em contra-corrente, apresentam maior probabilidade de sofrerem descoleta ao longo da espessa camada de espuma existente no topo da coluna, camada esta submetida à ação contínua da água de lavagem;

ii) A coluna oferece capacidade limitada quando o minério possui grande massa a ser flotada ou ainda quando for preciso trabalhar

em etapas "cleaner" utilizando polpas que exibem altas percentagens de sólidos e grandes quantidades de partículas muito finas.

Apesar de todo conhecimento até aqui gerado, no que tange a seus princípios, mecanismos e aplicações, em algumas situações da prática industrial ainda não se sabe até que ponto é vantajoso ou não o uso da coluna de flotação, sendo que os estudos comparativos de desempenho de células mecânicas versus coluna não foram suficientemente exaustivos e/ou abrangentes para elucidar algumas indagações do tipo:

- i. Qual a real influência das características da coluna de espuma no desempenho do equipamento ? Será a espuma apenas um elemento de transporte ? Se assim for, por que o uso de água de rinse (lavagem) ?
- ii. Existe uma tendência de se utilizarem circuitos industriais de flotação onde células mecânicas e de coluna atuem em paralelo. Qual a razão e o verdadeiro ganho de tal arranjo misto ?
- iii. Qual o nível de dificuldade e quais os fatores de escala que deveriam ser adotados para montar e operar um circuito piloto de flotação em coluna, tomando como base um desenvolvimento de processo executado em laboratório por meio de células convencionais ou de coluna ?

Esta dissertação busca compilar o maior número possível de informações sobre vários aspectos teóricos e práticos que envolvem o uso de colunas de flotação, buscando com isto, contribuir para que engenheiros interessados na nova tecnologia possam se familiarizar com os novos conceitos, "design", terminologia, variáveis, vantagens e limitações da recente inovação.

Apesar das inovações na coluna nos últimos 10 anos, a coluna tradicional ainda tem seu lugar reservado, principalmente na purificação de resíduos industriais líquidos e na recuperação de partículas ultrafinas.

## 2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

No último decênio, a flotação em coluna vem ganhando grande importância e projeção no âmbito da tecnologia mineral brasileira e internacional. Não obstante, por se tratar de desenvolvimento tecnológico relativamente recente, muitas lacunas ainda existem na sua aplicação tanto na fase de desenvolvimento de processos minerais, como no "scale-up" e implantação de um empreendimento a nível industrial.

Apesar de um grande número de empresas brasileiras de mineração estarem adotando a flotação em coluna em seus circuitos industriais, existe pouca literatura em português sobre o assunto, o que limita a possibilidade de muitos engenheiros de processo brasileiros terem acesso ao conhecimento dos vários aspectos relacionados à teoria e prática do emprego da nova tecnologia.

Assim sendo, a presente dissertação tem como objetivo levantar informações relevantes sobre células de coluna, buscando focar o tema sob os pontos de vista:

- i) Histórico/ Evolutivo;
- ii) Variáveis Operacionais;
- iii) Projeto e Equipamentos Semelhantes ;
- iv) Aplicações Atuais e Futuras.

### 3. ADVENTO HISTÓRICO E EVOLUTIVO DA FLOTAÇÃO EM COLUNA

O desenvolvimento da flotação até o final dos anos '50 foi baseado em estudos sobre a interação entre reagentes e minerais. O excesso de atenção que se deu às variáveis físico-químicas do processo<sup>(6,7,8)</sup> levou a um quase total esquecimento de suas variáveis hidrodinâmicas e, como consequência, relegou-se a um segundo plano a inovação no campo do desenvolvimento de novos equipamentos. Assim, a célula de flotação em coluna apareceu no Canadá no início dos anos '60. Foi inventada por PIERRE BOUTIN e REMI TREMBLAY. O primeiro foi pesquisador da empresa Eldorado Mining and Refining Ltd., e era o principal acionista na firma Column Flotation Co. of Canada Ltd (CFCC)<sup>(9)</sup>. O equipamento inventado era uma coluna de ar simples de altura muito maior do que sua área superficial. Se destacava por não apresentar partes móveis e os reagentes de flotação normais atuavam sobre as partículas minerais da mesma forma como em uma célula de flotação convencional.

Este equipamento foi algumas vezes chamado de "coluna canadense" devido a sua origem. Entretanto, com a disseminação de várias colunas, atualmente o nome mais utilizado para chamar estas colunas seria "coluna convencional", pois o mesmo princípio foi desenvolvido sob diferentes enfoques e concepções, buscando aprimorar a idéia inicial.

Inventada em 1961 (patentes canadenses de números 680.576, 680.654 e 694.547 e patente inglesa de número 970.841<sup>(10)</sup>) a coluna de flotação foi primeiro testada em minério de ferro em uma unidade de laboratório. Os ensaios iniciais utilizaram um sistema envolvendo estágios

"rougher-scavenger" em uma flotação reversa onde a sílica foi flotada a partir de um minério de ferro. A coluna produziu um concentrado tão bom ou melhor que o produzido em células convencionais. Os resultados iniciais foram promissores e foi gasto um ano para testá-la. Uma planta piloto foi instalada e excelentes resultados foram obtidos.

Em 1963, os esforços foram direcionados para o uso da coluna para concentração de sulfetos com igual sucesso. Os ensaios realizados com o minério da Opemiska Copper Mines (Quebec) Ltd. e os resultados foram tais que a pesquisa em planta piloto foi logo realizada.

A primeira coluna de flotação construída para operar em escala industrial foi uma unidade de 3 pés de diâmetro que foi instalada em novembro de 1963. Não foi um sucesso. Um programa de desenvolvimento foi empreendido, então, pela empresa Column Flotation Co. of Canada Ltd. em 1965 de modo a superar os problemas que impediram a coluna pioneira de operar adequadamente. Mesmo não se mostrando eficiente, essa coluna propiciou que os pesquisadores envolvidos criassem um sistema de remoção de espuma da coluna, usando-a como um condicionador enquanto era injetado ar dentro dela. Tal sistema foi patenteado e recebeu o nome de célula Maxwell. Os problemas de ineficiência foram resolvidos pela operação de uma coluna muito menor ( 18 polegadas quadradas ) e fazendo mudanças no projeto com ensaios progressivos. O projeto e controle da coluna de 18" foram efetivos e produziram resultados metalúrgicos satisfatórios. O objetivo do projeto foi atingido, gerando o modelo que até agora é conhecido (4).

Em 1980-81, em "Mines Gaspé" - Canadá -, duas colunas substituíram 13 células "cleaners" convencionais em um circuito concentrador de molibdênio, com resultados superiores. Em novembro de 1986, a empresa teve que mudar o tipo de minério que alimentava a usina. O novo minério não continha molibdênio e apresentou problemas metalúrgicos. Em vez de um concentrado de 25% de cobre como era obtido com o minério anterior, a planta de flotação convencional somente produzia de 16-18% de cobre uma coluna de 72" foi incorporada ao circuito como "cleaner" e produziu concentrados de cobre de 22-24% de teor com a mesma recuperação do circuito.

Desde então, diversas empresas que concentram minério de cobre em British Columbia (Canadá) têm instalado colunas em circuitos de flotação de cobre e de molibdênio, incluindo Gibraltar, Lornex, Highmont e Island Copper. As colunas de flotação estão sendo empregadas atualmente em diversos circuitos concentradores canadenses, em uma ampla gama de aplicações.

A flotação em coluna constitui hoje em dia, um dos avanços tecnológicos mais importantes na área de concentração de minérios. Isto está demonstrado pela crescente aceitação que tem conseguido esta tecnologia nos últimos anos, tanto na América do Norte como na do Sul, Austrália e África. Com efeito, na literatura técnica aparecem inúmeras aplicações da flotação em coluna, tanto a nível industrial como piloto, destacando o processamento de minerais de ferro<sup>(4,11)</sup>, de cobre<sup>(12,13,14)</sup>, fosfato<sup>(15,16,17)</sup>, urânio<sup>(18,19)</sup>, grafite<sup>(20)</sup> e carvão<sup>(21,22,23,24,81,82)</sup>, molibdênio<sup>(25,26,27,28)</sup>, cromo<sup>(29,30)</sup>, multicomponentes não metálicos (fluorita-

mica-berílio-silício)<sup>(30)</sup>, manganês<sup>(30)</sup> e jazidas polimetálicas de elementos preciosos (ouro-platina-prata-paládio)<sup>(30)</sup>. Na maioria destas aplicações, a flotação em coluna já permitiu melhorar sensivelmente a seletividade do processo acompanhada de mais alta recuperação, principalmente das frações mais finas.

O desenvolvimento e aplicação industrial das colunas de flotação, acarretou na disseminação de muitas publicações nesta área<sup>(3,4,11,12,20,25,29-39)</sup>. Os estudos fundamentais começaram em ritmo lento. SASTRY; FUERSTENAU (1970)<sup>(40)</sup>, FLINT; HOWARTH<sup>(41)</sup> e RICE et al. (1974)<sup>(42)</sup>, analisaram as características de coleta e mistura dentro de colunas de flotação. A partir de 1984, o número de estudos de flotação em coluna aumentou notavelmente<sup>(13,15,21,22,35,41,43-59,83,85)</sup>. Em 1981, o Departamento de Minas e Metalurgia da Universidade de McGill (Montreal, Canadá) iniciou um estudo dos fundamentos da flotação em coluna, estabelecendo os requisitos básicos para seu modelamento e "scale-up"<sup>(46-50)</sup>. Em 1987, os pesquisadores FINCH; YIANATOS<sup>(60)</sup>, difundiram estes conhecimentos em um Seminário de flotação em coluna ocorrido no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Maria, na cidade de Valparaíso, Chile. Os aspectos teóricos mais relevantes à aplicação prática da flotação em coluna serão revistos, apresentados e discutidos no decorrer desta dissertação.

Os impactos provenientes dos resultados obtidos nas diversas aplicações comerciais da flotação em coluna a nível mundial, particularmente em processos de separação cobre/molibdênio; despertaram um interesse generalizado da indústria mineira, e no caso do Chile do CIMM

( Centro de Investigación Minera y Metalúrgica ) em particular, para avaliar a fundo as vantagens e desvantagens que esta nova tecnologia poderia apresentar frente a cada aplicação específica de interesse. Em 1985, a Divisão Mineralúrgica do CIMM, do Chile adquiriu uma unidade experimental de 2 polegadas de diâmetro e altura variável até um máximo de 26 pés, com o principal objetivo de facilitar a avaliação do desempenho da flotação em coluna através do uso de diferentes polpas de minerais e concentrados nacionais. Posteriormente, em 1986, a CIMM adquiriu uma unidade piloto de flotação em coluna SALA/Deister de propriedade da Allis-Chalmers (Coluna Flotaire Piloto, comercializada pela firma Deister Concentrator Co. dos EUA), que consiste essencialmente em um tubo vertical de 8 polegadas de diâmetro interno, constituída por dois módulos individuais de 12 pés de longitude cada um, conformando assim uma unidade cuja altura total alcança 24 fts.

Uma série de desenvolvimentos na tecnologia de células de flotação tem surgido, a partir da coluna convencional. DELL<sup>(61)</sup>, desenvolveu a Coluna Leeds, especialmente para flotação de carvão e ela acabou sendo comercializada pela empresa WEMCO<sup>(62)</sup>. Outros tipos de células de coluna que apareceram recentemente no mercado são as pneumáticas<sup>(63,64)</sup> e a coluna Flotaire<sup>(65)</sup>. As modificações da coluna de flotação que estão a nível de pesquisa são o sistema de coluna empacotada "packed column"<sup>(66)</sup>, a injeção de microbolhas geradas eletroquimicamente dentro de uma coluna de flotação<sup>(67)</sup>, geração de bolhas por cavitação<sup>(68)</sup>, o ciclone de ar aspergido ("air-sparged"), que tem sido descrito como uma coluna de flotação "swirl-flow"<sup>(69)</sup> e o uso de colunas muito pequenas tais como as

propostas por JAMESON<sup>(70)</sup>, que podem atingir até 25% da altura das colunas convencionais.

Diversos sistemas de controle, desenvolvidos no Canadá<sup>(71,72,73,77,78)</sup>, Japão<sup>(74)</sup>, Chile<sup>(75)</sup> e Estados Unidos<sup>(76)</sup> reportados em literatura. O sistema ColumnEx<sup>(71)</sup> se destaca por sua simplicidade.

No Brasil, algumas universidades e centros de pesquisa têm se destacado em pesquisas no âmbito da flotação em coluna:

i. CDTN - Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, em Belo Horizonte<sup>(86-89)</sup> e o CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, no Rio de Janeiro<sup>(5,90)</sup>;

ii. A UFRS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul<sup>(91)</sup> e a Universidade Federal de Minas Gerais<sup>(92,93)</sup>;

As empresas brasileiras de mineração parecem estar em franco processo de adoção da flotação em coluna em diversas etapas de seus circuitos industriais de flotação:

i. A Samarco Mineração S.A. utiliza colunas no circuito de "recleaner", ( células de 13,60 m de altura por 3,65 m de diâmetro ) e no estágio "scavenger" ( colunas de 11,0 m de altura e 2,5 m de diâmetro ). Tais colunas foram projetadas pela *Cominco Engineering Services*, do Canadá.

ii. A CBMM ( Cia. Brasileira de Mineração e Metalurgia ) que explora e concentra pirocloro em seu empreendimento localizado em Araxá-MG instalou uma coluna DEISTER, para limpeza de seu concentrado;

iii. A Mineração Manati, que transformou todo o seu circuito convencional para um circuito de colunas, sendo que neste caso, as colunas foram construídas no próprio local<sup>(92)</sup>.

iv. Outras empresas de mineração vêm conduzindo estudos específicos para substituição das células convencionais por coluna. Tem-se como exemplo: fosfato ( Fosfértil, Goiásfértil, Arafértil), carvão (Carbonífera Araranguá), talco ( Sindicato dos Mineradores de Talco de Ponta Grossa ), ouro ( RTZ ), cobre ( CVRD ), fluorita ( Mineração Del Rey), zinco oxidado (Cia. Mineira de Metais) e ferro (MBR, CVRD )<sup>(86,90,93)</sup>.

Apesar do presente "boom" experimentado pela flotação em coluna no Brasil, um outro tipo de flotação não-convencional também merece destaque: a célula Bahr, também denominada "célula pneumática". Até muito recentemente, a Serrana S.A. de Mineração concentrava um terço da massa que alimentava sua principal usina de concentração ( Usina 320 ) através de apenas 2 células pneumáticas operando em série ( "cleaner + "scavenger"). O trabalho de desenvolvimento e implantação destas células no circuito industrial da Serrana S.A. de Mineração foi reportado por OLIVEIRA<sup>(63)</sup> que comparou em escala industrial resultados da flotação aniônica direta do fosfato de Jacupiranga em célula de flotação pneumática versus flotação em célula mecânica, obtendo resultados de recuperações globais de cerca de 2% a 4% superiores para concentrados apatíticos, em

favor da célula pneumática. Esta inovação operou de 1985 a 1990 e teve o mérito de ser pioneira no Brasil no uso de células de flotação não-convencionais em escala industrial. Com o advento do período recessivo da economia ( após 1989 ), a produção de rocha fosfática foi diminuída e as células foram colocadas fora de operação. Outros resultados podem se destacar neste trabalho, quais sejam:

i. A célula pneumática tem sua maior eficiência ligada à fração mais grossa;

ii. As recuperações metalúrgicas são quase sempre maiores, com valores de até 5% superiores (3% em média), dependendo do tipo de minério e para produtos finais de 34% a 36% de  $P_2O_5$  , em função da estratégia de operação/homogeneização posterior de concentrados, definidas pelas necessidades de produção;

iii. Houve simplificação de circuito, passando de um sistema "rougher" / "scavenger" / "cleaner" / "recleaner" , nas células mecânicas, para "rougher" / "scavenger" nas pneumáticas;

iv. Os enriquecimentos em teores de  $P_2 O_5$  nas células pneumáticas são superiores, não havendo dificuldades em se obter concentrados de 35% de  $P_2O_5$  ; considerando-se que a alimentação nova (minério fresco) da flotação tem cerca de 6% de  $P_2O_5$  , as relações de enriquecimento chegam, assim à cerca de seis vezes, e

v. As células pneumáticas sem partes móveis e sem áreas de desgaste, apresentam custos de manutenção sensivelmente menores. Quando comparadas com o circuito de células mecânicas, há uma diferença média de 20% nos custos de manutenção dos circuitos.

Mais recentemente a empresa alemã KHD, através de sua subsidiária Ekhof tem produzido e implantado células pneumáticas em vários empreendimentos europeus, australianos e chilenos. No Brasil esta empresa tem trabalhado com o processo Fosfértil e Samarco.

#### **4. ASPECTOS ESTRUTURAIS E DE FUNCIONAMENTO DE COLUNAS DE FLOTAÇÃO (30,34,46-52,94-97)**

A técnica de flotação em coluna foi concebida para utilizar o princípio de fluxo e contracorrente, visando a melhores separações no processo de flotação, em especial no processamento de partículas finas.

Os inventores afirmam que a flotação em coluna não é uma variação da flotação em espuma, no sentido clássico. Na coluna, ao contrário das células mecânicas, a camada de espuma formada não desempenha prioritariamente o papel de concentração da fração flotada, servindo, prioritariamente, como meio de transporte.

Ensaio comparativos entre colunas e células mecânicas de flotação foram realizados com diversos minérios, permitindo conclusões

acerca do melhor desempenho da coluna, quando se trata de partículas finas.

A coluna de flotação em contracorrente é um tipo de sistema de flotação pneumático, composto basicamente de duas seções:

- i. seção de flotação: situada entre a entrada de ar e o ponto de alimentação da polpa. É a parte onde ocorre o fluxo em contracorrente da polpa e das bolhas de ar. Não há agitação e o nível de turbulência é bastante reduzido, provendo-se condições ideais para a adesão entre partículas e bolhas. Esta seção é também conhecida como seção de concentração;
- ii. seção de limpeza: corresponde ao volume compreendido entre a entrada da alimentação e a descarga do flotado. Nesta seção ocorre o fluxo em contracorrente de bolhas mineralizadas e da água de lavagem, introduzida no topo da coluna.

A polpa, após ser condicionada com os reagentes e ter sua porcentagem de sólidos e pH ajustados, é introduzida na coluna em um ponto localizado no seu terço superior, abaixo da camada de espuma. O ar é introduzido sob pressão positiva na parte inferior, passando por sistemas projetados para gerar bolhas de pequeno diâmetro. A descarga do material não-flotado se dá pelo fundo. Tal fluxo flui por gravidade para caixas de bombas que transportam a polpa para outras etapas posteriores do processo. A remoção do flotado se processa por transbordo, na parte superior.

Algumas particularidades das características operacionais da coluna são discutidas a seguir<sup>(34)</sup>:

- A. Inexistência de partes móveis. Os sólidos são mantidos em suspensão pelas bolhas de ar em trajetória ascendente.
  
- B. Presença de água de lavagem, nome dado à água introduzida na espuma com dois propósitos: ajustar o balanço do fluxo de materiais através da coluna e "lavar" a espuma, removendo as partículas arrastadas, produzindo-se uma elevação no teor do flotado.

A célula convencional utiliza a camada de espuma atuando como um dreno, de modo a permitir um melhor efeito de concentração. Tal camada age como um "filtro mecânico", rejeitando de modo eficiente partículas que ali chegam por efeito de arraste. Os contaminantes presentes em granulometrias mais finas acompanham o flotado, não sofrendo a ação de drenagem imposta pela camada de espuma, devido ao seu tamanho reduzido e à sua baixa velocidade de sedimentação. O fato de que a água contida na espuma é a mesma que foi introduzida com a alimentação faz com que os finos, por efeito de arraste hidromecânico, acompanhem a partição de água entre o flotado (espuma) e o não-flotado, sendo tal contaminação, geralmente, inevitável.

Na célula de coluna, a água contida na espuma não é a mesma água introduzida com alimentação, mas sim a água de lavagem. DOBBY; FINCH<sup>(46)</sup>, demonstraram a eficiência com que a água de lavagem substitui

a água de alimentação na constituição da espuma, calculando que apenas cerca de 1% da água que entra sob forma de polpa de alimentação acompanha o flotado.

C. Fluxo de polpa : uma operação estável exige uma vazão constante da polpa de alimentação. A taxa de alimentação não deve exceder a capacidade da coluna, sob o risco de reduzir o tempo de retenção e conseqüentemente, a recuperação. A introdução da polpa de alimentação deve ser feita de modo não pulsativo e com velocidade suficiente apenas para atingir o ponto de entrada. Excesso de pressão pode provocar distúrbios na coluna que prejudicariam a definição da interface polpa/espuma.

D. Ar: o volume de ar necessário é função da vazão de sólidos que alimenta a coluna. Excesso ou falta de ar tendem a prejudicar a estabilidade do processo.

Um dos problemas sérios encontrados na operação de uma coluna é a obtenção de um dispositivo aerador eficiente<sup>(4)</sup>. Vários tipos de materiais porosos podem ser usados: chapas de aço micro-perfuradas, placas de borracha ou teflon perfuradas, porcelana porosa, pano de filtro, etc. O entupimento ou mesmo a quebra do aerador (devido à injeção de ar pressurizado) são os problemas mais comuns.

DOBBY; FINCH<sup>(46)</sup>, defendem o uso de aeradores de borracha micro-perfurada, que se expandem sob a pressão do ar injetado, permitindo

o seu escape devido à dilatação dos furos. A contração espontânea que ocorre no caso de se interromper o fluxo de ar impede o entupimento dos furos.

Outra opção é o emprego de um aerador construído de aço inoxidável com formato cilíndrico. Apenas a área lateral vertical do cilindro é micro-perfurada (furos com 0,010 mm de diâmetro) de modo a se evitar a obstrução dos furos pelos sólidos que se dirigem ao ponto de descarga do produto não-flotado.

E. Interface espuma/polpa<sup>(4)</sup>: A posição da interface espuma/polpa deve se situar acima do ponto de alimentação de polpa. O seu controle é realizado regulando-se a relação entre as vazões de alimentação e descarga do material deprimido. A interface deve ser nítida, entretanto, tende a sofrer oscilações devido a variações da quantidade de sólidos a ser flotada. A posição da interface pode também ser controlada através do ajuste da água de lavagem.

F. Descarga do não-flotado: o não-flotado é descarregado por ação da gravidade e completado por operação de bombeamento, sendo que alterações na sua vazão constituem o modo mais rápido de se modificar o tempo de residência da polpa na coluna.

Na condição de estabilidade, o fluxo do não-flotado deve exceder o de alimentação devido à água de lavagem introduzida ("bias" positivo).

G. Porcentagem de sólidos na alimentação: segundo WHEELER<sup>(37)</sup>, este não é um fator determinante na operação. Maiores porcentagens de sólidos neste fluxo podem vir a ser benéficas à medida que a polpa tem a sua viscosidade aumentada, diminuindo a velocidade de sedimentação das partículas permitindo maior probabilidade de contato partícula/bolha.

É importante salientar que, apesar da primeira utilização industrial da coluna ter ocorrido em 1980, não se trata de um desenvolvimento recente. Desde a sua concepção, a técnica aguardou por quase vinte anos a oportunidade de um teste industrial. Se o período de incubação foi grande, por outro lado a expansão foi muito rápida e, portanto, o comportamento de todas as variáveis ainda não se encontra plenamente explicado. Apesar de algumas lacunas tecnológicas, a simulação de flotação em coluna através de modelos matemáticos parece estar muito à frente da flotação em células mecânicas. De fato, alguns trabalhos de simulação já apresentaram resultados bastante positivos, como os de CASTILLO; DOBBY<sup>(98)</sup>. Este avanço certamente se deve ao fato da flotação em coluna apresentar maior possibilidade de ter algumas de suas variáveis medidas "on line" através de modernas técnicas instrumentais: espessura da camada de espuma, volume de gás adicionado, volume de água de lavagem, etc.

Estudos sobre a geração de bolhas, distribuição de tamanhos e mistura da fase de espuma com a polpa estão sendo desenvolvidos principalmente no Canadá e África do Sul<sup>(99,100,101)</sup>. MOYS e colaboradores<sup>(99)</sup>, mostraram que a utilização de defletores ("baffles")

aumenta a distribuição de tempo de residência, tornando a coluna mais efetiva para operações "rougher" e "scavenger".

Na Figura 1, tem-se esquematizada uma célula típica de flotação em coluna, mostrando suas distintas zonas de operação e as características básicas de funcionamento do equipamento.

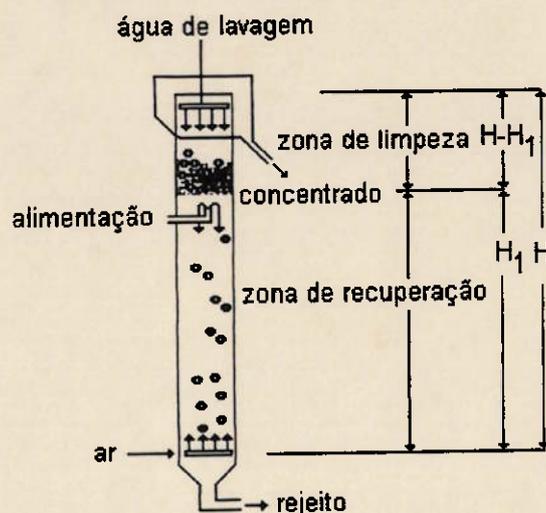


Figura 1 - Coluna de Flotação Convencional

Uma das características básicas que a célula de coluna apresenta é sua elevada razão "altura/ diâmetro equivalente" ( $H/Deq. \geq 10/1$ ), a qual quando se compara com células convencionais de flotação, dá origem a um maior tempo médio de residência das partículas no equipamento. No que se refere à seção transversal da coluna, esta pode ser de forma quadrada, retangular ou circular (neste último caso,  $Deq. = D =$  Diâmetro da coluna; entretanto no caso de uma coluna com seção transversal quadrada,  $Deq. = a \cdot \sqrt{4/\pi} \cong 1,1284 a$ , sendo  $a =$  longitude da aresta ).

A polpa de alimentação de uma coluna se introduz lateralmente entre 2,0 - 2,5 metros abaixo de sua borda superior (isto equivale a 17-20% da altura total, H). A polpa alimentada desce por gravidade em sentido contrário ao de um fluxo de bolhas produzido no fundo da coluna (mediante a injeção de ar através de um difusor poroso; ou, também injetando diretamente as bolhas de ar produzidos através de um mecanismo gerador externo). O sistema em contracorrente de polpa e ar, permite coletar as partículas hidrofóbicas que depois de colidir com as bolhas, aderem-se a elas e são transportadas para o concentrado, transbordando por sobre a parte superior do equipamento. As partículas hidrofílicas e as menos hidrofóbicas, são removidas pelo fundo da coluna, constituindo o fluxo de rejeito. Desta forma, se costuma denominar de **zona de recuperação**, aquela seção da coluna compreendida entre o ponto de entrada do ar e o nível de alimentação de polpa do equipamento. De outro modo, se entende por **zona de limpeza**, aquela seção da coluna compreendida desde o nível de alimentação da polpa até a parte do concentrado, localizado no topo da unidade.

A vazão de rejeito deverá ser sempre superior a da alimentação, condição normalmente chamada de "Bias positivo" ( $Bias > 0$ ). Tal situação, obriga a injeção de uma quantidade de água de lavagem, por sobre o nível da espuma, de modo a garantir um fluxo líquido de polpa descendente na zona de limpeza. Este processo de elutriação junto às bolhas mineralizadas não ocorre em células de flotação convencionais com tamanha extensão intensidade. Sua meta é proporcionar uma efetiva eliminação da maior parte das partículas de ganga normalmente arrastadas para a fase de espuma, aumentando assim o teor do concentrado resultante ( com isto, se evita em

grande parte o arraste hidráulico das partículas finas de ganga para o concentrado)<sup>(46-52)</sup>.

A coluna de flotação tem demonstrado ser particularmente atrativa em aplicações de limpeza ( etapas "cleaner" ), permitindo alcançar em uma só etapa considerável aumento no teor de concentrado, aumento este equivalente ao de várias etapas de limpeza convencionais (usando células mecânicas de flotação), com uma considerável melhora na recuperação<sup>(3,32,39)</sup>.

Três aspectos principais de projeto distinguem a coluna de flotação de uma célula mecânica<sup>(97)</sup>:

1 - A água de lavagem ( introduzida geralmente no topo da camada de espuma, na forma de "chuva" suave ou "spray" ), que permite construir um leito de espuma estável e profundo. Através deste leito, se mantém um fluxo líquido descendente de água, que evita o arraste hidráulico das partículas finas de ganga para o concentrado.

É importante destacar, que a maior proporção de água de lavagem que se adiciona ao topo da coluna, é recuperada junto ao concentrado<sup>(31)</sup>. Desta forma, é sempre importante conhecer "a priori" o comportamento dos diferentes tipos de minerais (fortemente flotáveis, mediamente flotáveis e não flotáveis) frente a água de lavagem, com o objetivo de otimizar o efeito produzido por esta importante variável de operação na coluna de flotação.

2 - A ausência de agitação mecânica na célula de coluna (condições ligeiramente próximas do regime de escoamento laminar), que permite separar as espécies úteis da ganga de forma mais tranquila que na flotação convencional, devido à eliminação da turbulência provocada por agitadores mecânicos ("impellers"). Isto permite a diminuição nos custos de operação (fundamentalmente energia e manutenção) nas células de colunas, em comparação com as células mecânicas convencionais.

3 - O sistema de geração de bolhas na célula de coluna que pode ser interno (injeção de ar através de um difusor poroso) ou externo (um mecanismo gerador de bolhas similar aos desenvolvidos pela U.S.B.M.)<sup>(29,97)</sup>. Neste último caso, se pode obter um tamanho ótimo de bolhas aplicável a qualquer aplicação específica de flotação em coluna, regulando para isto os fluxos de ar e água utilizados no sistema Turbo-Ar<sup>(29,30,96)</sup>, junto com a adição de uma pequena quantidade de reagente espumante ( $\leq 13$  ppm) para estabilizar as microbolhas geradas e evitar sua coalescência<sup>(\*)</sup>.

---

<sup>(\*)</sup> Coalescência é o termo utilizado quando se tem uma condição na qual a coluna pode não reter mais o ar. As vezes acontece quando o Hold-up está acima de 16%, resultando em uma violenta quebra na espuma, dificultando com isso o aprisionamento da partícula mineral.

## 5. BALANÇO DE MASSAS E VOLUME EM UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO

O engenheiro de processos se vê freqüentemente frente a situações onde o balanço de massas e metalúrgico se faz necessário tanto para o controle operacional como na simulação e modelamento. Sendo a flotação em coluna um processo que introduz novas variáveis operacionais facilmente controláveis e mensuráveis ( água de lavagem e "hold up") acompanhadas de conceitos que auxiliam a prática operacional ( bias positivo ou negativo, por exemplo ), se faz imprescindível que se conheçam as relações mássicas e volumétricas inerentes às novas variáveis e como estas influenciam os cálculos para o balanço de massa e volume de polpa do processo de flotação em coluna.

O balanço de massa global em coluna é apresentado abaixo:

$$F = C + T \quad (1)$$

onde: F = alimentação de polpa da coluna ( kg/h)

C = concentrado da coluna ( kg/h)

T = rejeito da coluna ( kg/h)

O balanço de volume global pode ser dividido em duas partes: sólida e líquida, como está apresentado na equação (2).

$$Q_{fs} + Q_{fl} + Q_{ww} = Q_{cl} + Q_{cs} + Q_{tl} + Q_{ts} \quad (2)$$

onde:  $Q_{fs}$  = vazão de sólidos na alimentação (  $m^3/h$  )

$Q_{fl}$  = vazão de líquidos na alimentação (  $m^3/h$  )

$Q_{ww}$  = vazão de água de lavagem (  $m^3/h$  )

$Q_{cl}$  = vazão de líquido no concentrado (  $m^3/h$  )

$Q_{cs}$  = vazão de sólido no concentrado (  $m^3/h$  )

$Q_{tl}$  = vazão de líquido no rejeito (  $m^3/h$  )

$Q_{ts}$  = vazão de sólidos no rejeito (  $m^3/h$  )

$Q_{wwt}$  = vazão de água de lavagem no rejeito (  $m^3/h$  )

$Q_{wwc}$  = vazão de água de lavagem no concentrado (  $m^3/h$  )

$Q_t$  = vazão de rejeito (  $m^3/h$  )

$Q_f$  = vazão de alimentação (  $m^3/h$  )

$Q_c$  = vazão de concentrado (  $m^3/h$  )

A vazão de água de lavagem,  $Q_{ww}$ , quando entra na coluna é dividida em duas: uma quantidade irá sair com o rejeito,  $Q_{wwt}$  e a outra sairá com o concentrado,  $Q_{wwc}$ . Tal que:

$$Q_{ww} = Q_{wwt} + Q_{wwc} \quad (3)$$

A Figura 2, apresenta a condição de trabalho ótimo em uma coluna de flotação, ou seja, mostra o balanço para se ter bias positivo.

Para que isso aconteça a vazão de rejeito é mantida mais alta que a vazão de alimentação. Quando isto acontece, segundo DOBBY; FINCH<sup>(10)</sup>, menos de 1% da água da alimentação irá para o concentrado, isto foi demonstrado por eles através de ensaios com traçadores no circuito de flotação de cobre de Gaspé - Canadá. Portanto, é seguro afirmar que toda a água associada com o concentrado é oriunda da água de lavagem. Com

isso pode-se dizer que os teores mais altos de concentrado resultam devido a menor quantidade de partículas de minerais de ganga carregados para a massa flotada.

Então para as condições em que  $Q_t > Q_f$ , temos:

$$Q_{tl} = Q_{wwt} + Q_{fl} \quad (4)$$

Pode-se afirmar também que:

$$Q_{cl} = Q_{wwc} \quad (5)$$

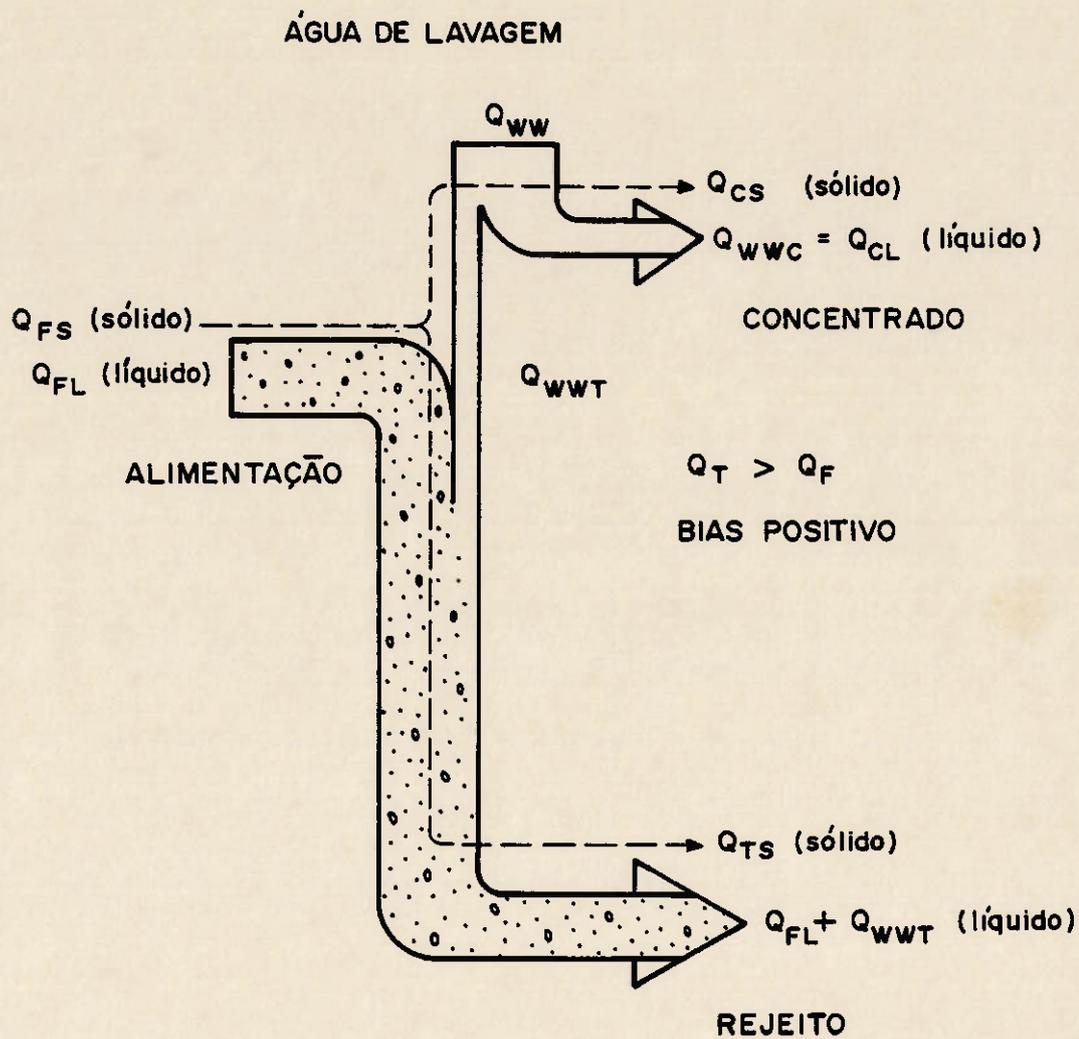


Figura 2 - Balanço do Bias Positivo (Bias >0)

Podemos definir o regime de Bias, como sendo:

$$\text{BIAS} = Q_t - Q_f \quad (6)$$

ou

$$\text{BIAS} = (Q_{tl} + Q_{ts}) - (Q_{fl} + Q_{fs}) \quad (7)$$

Substituindo a equação (4) em (7), tendo que  $Q_{fs} = Q_{ts} + Q_{cs}$ , temos que:

$$\text{BIAS} = Q_{wwt} - Q_{cs} \quad (8)$$

Substituindo agora a equação (3) em (8), obtem-se:

$$Q_{ww} = Q_{wwc} + \text{BIAS} + Q_{cs} \quad (9)$$

Portanto, temos finalmente:

$$Q_{ww} = Q_c + \text{BIAS} \quad (10)$$

A água de lavagem portanto, é dependente diretamente da quantidade de concentrado produzido, conseguido com a coluna operando com Bias positivo.

Outro fato importante é que o controle do nível de polpa em circuito fechado é mantido constante através da variação de água de lavagem,

segundo a equação (10). Então, quanto maior a vazão de concentrado (recuperação de massa muito maior), maior será a quantidade de água de lavagem requerida para manter o nível de controle<sup>(39)</sup>.

## 6. VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO

Fazendo-se uma compilação das principais variáveis de operação e projeto exibidas por colunas de flotação operando em circuitos industriais e piloto do Canadá, Chile e EUA, assim como sua faixa de variação nos diferentes empreendimentos, tem-se os dados apresentados na Tabela 1. Estes valores podem ser utilizados como ponto de partida quando se deseja iniciar algum teste com células de coluna ou ainda propiciar uma visão de conjunto de como a magnitude de tais variáveis pode variar dentro de um leque realista de aplicações práticas.

Tabela 1 - Condições típicas de operação e projeto em células de coluna de flotação

Jg = Velocidade Superficial do Gás	= 0,5 - 3,0 cm/s
Jp = Velocidade Superficial de Polpa de Alimentação	= 0,7 - 2,0 cm/s
Jw = Velocidade Superficial da água de lavagem	= 0,1 - 0,8 cm/s
Jb = Velocidade Superficial do Bias	= 0,07 - 0,3 cm/s
He = Altura de espuma	= ≥ 1 m
db = Tamanho médio da bolha	= 0,5 - 3,0 mm
H/Deq. = Razão "altura/diâmetro.Eq." Coluna	= ≥ 10/1
Aplicações:	Cu, Mo, Pb, Zn, Ni, F, Cr, Nb, Fosfatos, Carbonatos, etc.

A seguir são apresentados os efeitos produzidos pelas variáveis operacionais e de projeto mais importantes, em uma célula de coluna de flotação<sup>(21,25,94,97)</sup>.

### 6.1. Fluxo de Gás (ou Ar)

O fluxo de ar é admitido na coluna em sua porção inferior e as bolhas de ar sofrem ascensão ao longo da coluna. As partículas minerais são alimentadas na porção superior da zona de recuperação e entram em regime de sedimentação ao longo da coluna. Ao se encontrarem as bolhas de ar com as partículas candidatas à flotação ( naturalmente hidrofóbicas ou hidrofobizadas através da ação dos agentes coletores ), estas últimas se aderem seletivamente às primeiras. Este fenômeno ocorre preferencialmente na **zona de recuperação** da coluna. A literatura oferece evidências de que a adesão não acontece entre unidades isoladas bolhas/partículas, mas sim através de interações coletivas que formam verdadeiros agregados formados entre bolhas e partículas hidrofóbicas. Devido à massa do agregado ser muito menor que seu volume, a densidade do conjunto é muito menor que a da polpa, o que permite sua flutuação, que se dá através de transporte ao longo da zona de limpeza. A pequena turbulência do meio permite, então, maior integridade aos agregados bolhas/partículas durante sua trajetória ascendente, favorecendo com isto um melhor desempenho.

A oferta de bolhas de ar em qualidade e quantidade necessárias ao bom desempenho do processo é função da quantidade de gás que se alimenta no sistema. Assim sendo, o fluxo de gás pode ser considerado

como um parâmetro muito importante para o sucesso da flotação em colunas e bastante crítico quando se faz necessário projetar seu "scale up".

Quando um engenheiro de processos executa o "scale up" de um sistema de flotação em colunas, um dos mais importantes desafios é fazer uma estimativa realista do volume de gás que deve ser introduzido no sistema. Para auxiliá-lo nesta tarefa a literatura corrente<sup>(31,37,97)</sup> aponta três caminhos: um fenomenológico ( baseado no fato de que a velocidade superficial de gás deverá ser a mesma independentemente da dimensão da célula ), outro empírico ( calcado na prática industrial e limitado por inúmeras condições padrão ) e ainda outro baseado em modelos populacionais:

i. Fazer uso de uma variável muito importante denominada **Velocidade Superficial de Gás** que é representada pelo símbolo  $J_g$  (cm/s). Esta variável é definida como a vazão volumétrica de gás (ou ar) requerida por área unitária de fluxo (área da seção transversal da coluna)<sup>(97)</sup>. A prática operacional tem mostrado que o consumo de ar nas colunas, independentemente do seu tamanho, pode ser via de regra considerado como função de  $J_g$ , advindo daí a grande contribuição desta variável quando se necessita fazer "scale up". A velocidade superficial do gás ( $J_g$ ;cm/s) pode ser calculada através da seguinte expressão<sup>(97)</sup>:

$$J_g = \frac{P_c \cdot J_g^* \cdot \ln \left( \frac{P_T}{P_c} \right)}{P_T - P_c} \quad (11)$$

onde:  $J_g^*$  = velocidade superficial do gás nas CNTP<sup>(\*)</sup> medidas no topo ("transbordo") da coluna, ( cm/s).

$P_c$  = pressão absoluta no "transbordo" (topo da coluna),( KPa).

$P_T$  = pressão absoluta no fundo da coluna,( KPa).

Por exemplo, em uma coluna de 10 m. de altura,  $P_T \cong 2 P_c$ , então,  
 $J_g = 0,69 J_g^*$ .

ii. Outra forma usual para se estimar o fluxo de ar requerido em um exercício de "scale up" foi proposta por WHEELER)<sup>(31,37)</sup> e tem como base a premissa do autor de que 1 pé cúbico de ar ( na condição padrão de 1 atm de pressão, temperatura de 273 °K e ainda com a utilização de aeradores projetados, descritos, construídos e comercializados pelo referido autor ) deveria apresentar a capacidade de flotar em torno de 3 lbs. de concentrado seco. Tal aproximação empírica é ainda limitada pelo diâmetro médio das bolhas geradas nos aeradores ( estimado em 1,0 mm )

iii. A superfície das bolhas.é o único meio eficiente e adequado para conduzir as partículas hidrofóbicas para o flutuado dentro de um sistema de flotação em colunas. Consequentemente, uma forma racional de estimar o consumo de ar requerido poderia ser a avaliação da área superficial total de bolhas necessárias para executar o transporte em cada aplicação específica de flotação em coluna. Esta análise pode ser extendida para obter uma estimativa preliminar da capacidade da coluna, baseada nas limitações de

---

<sup>(\*)</sup> As Condições Normais de Temperatura e Pressão são as seguintes: 1 atmosfera de pressão e 273K de temperatura.

transporte das partículas coletadas pelas bolhas. Em termos gerais, convém gerar bolhas de tamanho pequeno (0,4 a 0,8 mm de diâmetro) a níveis ótimos de velocidade superficial do gás, com o objetivo de maximizar a velocidade de coleta das partículas e garantir seu transporte até a fase de espuma, porém evitando simultaneamente de produzir um excesso de turbulência dentro da coluna<sup>(49,53)</sup>. Em qualquer caso, entretanto existirá um tamanho ótimo de bolha aplicável a cada situação específica de flotação em coluna<sup>(30,94,96)</sup>, o que deverá ser determinado experimentalmente para cada tipo de mineral a ser trabalhado. Modelos populacionais têm se mostrado muito úteis para compreensão de fenômenos que ocorrem em sistemas complexos de beneficiamento de minérios, como é o caso da moagem. Por outro lado, tais modelos demandam uso intensivo de técnicas computacionais e estimativas muito precisas de variáveis pouco palpáveis ( como por exemplo "fator de quebra" no caso da moagem ). Tais características fazem com que esses modelos sejam usados mais como instrumento de pesquisa pelo meio acadêmico que como ferramenta útil na solução de problemas práticos como dimensionamento ( "scale up" ) de equipamentos.

## **6.2. Água de Lavagem**

O termo "água de lavagem" é utilizado para se referir à água que se injeta de forma suave na zona superior de transbordo de uma coluna. O propósito de sua utilização é conseguir melhorar a qualidade ou teor do produto flotado quando este é o produto de uma flotação direta ou minimizar a perda de matéria útil quando se trata de uma flotação reversa.

Mediante um processo contínuo de elutriação, a água de lavagem é capaz de arrastar consigo, em sua trajetória descendente, muitas partículas existentes na Zona de Limpeza e que não deveriam estar lá, por se tratarem de impurezas. O fato indesejável de tais partículas terem sido incluídas na camada de espuma pode ser devido ao arraste mecânico de partículas hidrofílicas finas que foram arrastadas pela água. Neste caso, o uso da água de lavagem permite se manter um fluxo líquido descendente (condição de bias positiva - predominante), o qual evita o arraste hidráulico de minerais não flotáveis.

Outro aspecto positivo do uso da água de lavagem é o fato de que, ao se juntarem coletivamente bolhas e partículas na Zona de Recuperação, pode ocorrer aprisionamento aleatório de partículas hidrofóbicas (candidatas a afundar e não flutuar ) no interior dos agregados partícula/bolha. O movimento ascendente de tais agregados pode conduzir muitas impurezas para a Zona de Limpeza. O uso da água de lavagem em contra-corrente, poderia auxiliar na purificação destes agregados que, quando sob ação mecânica de tal água, liberariam as partículas hidrofílicas aprisionadas no seu interior. Estas, por serem hidrofílicas, teriam tendência de acompanhar a trajetória de tal fluxo de água.

A seguinte fórmula, permite estimar a quantidade de água de lavagem (W) requerida na célula de coluna, em função da respectiva velocidade superficial deste componente (Jw).

$$W (l / \text{min}) = 0,06 \cdot Jw \cdot Ac \quad (12)$$

onde:  $A_c$  = Área transversal da coluna ( $\text{cm}^2$ )

$$J_w = J_c + J_b \quad (13)$$

$$J_c = J_g^* \cdot \varepsilon_c / (1 - \varepsilon_c) \quad (14)$$

$J_c$  = Velocidade superficial do concentrado ( $\text{cm/s}$ )

$J_g^*$  = Velocidade superficial do gás nas CNTP ( $\text{cm/s}$ )

$$\varepsilon_c = J_c / (J_c + J_g^*)$$

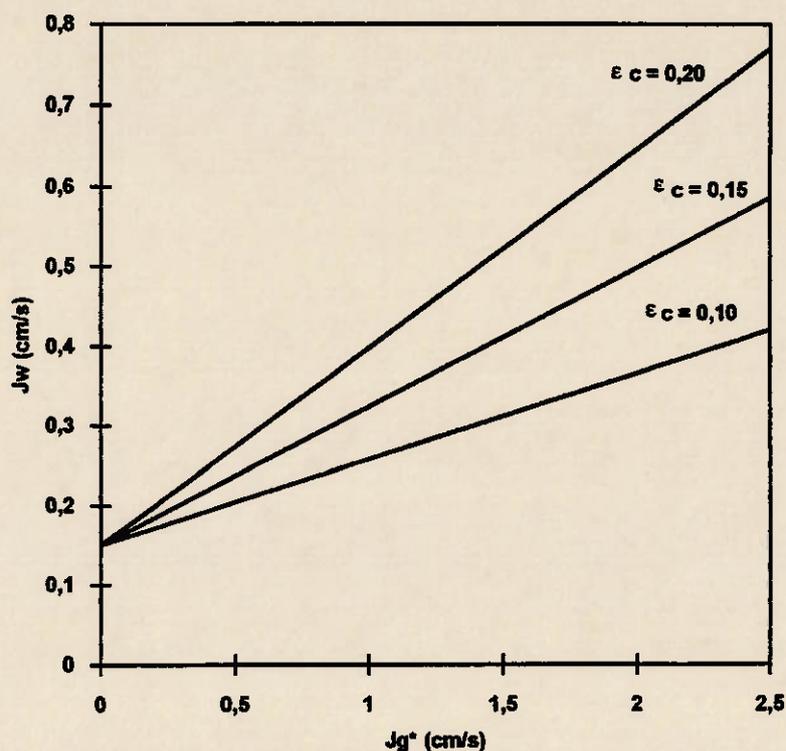
$$\varepsilon_c = \text{hold-up do concentrado (topo da coluna) (\%)} \quad (15)$$

$J_b$  = Velocidade Superficial do Bias ( $\text{cm/s}$ )

Nas plantas em operação, os valores típicos de  $\varepsilon_c$  estão na faixa entre 0,1- 0,2.

A velocidade da água ( $J_w$ ) mínima, é aquela necessária para expandir o leito de espuma até o nível do desaguadouro ( $\varepsilon_c = J_c = 0$ ). Nestas condições,  $J_w = J_b$ . Um aumento adicional da água de lavagem, aumentará tanto  $J_c$  como  $J_b$ . A profundidade do leito de espuma, é inversamente proporcional a  $J_w$  (ou  $W$ ).

A Figura 3, ilustra uma estimativa da água de lavagem baseada nas equações 13, 14 e 15, para um valor típico de  $J_b = 0,15 \text{ cm/s}$ .



$$J_w = \frac{J_{g^*} \cdot \epsilon_c}{1 - \epsilon_c} + J_b; \epsilon_c = \frac{J_c}{J_c + J_{g^*}}; J_b = 0,15 \text{ cm/s}$$

Figura 3 - Estimativa de água de lavagem<sup>(3)</sup>

### 6.3 -Altura da Espuma

A altura de espuma em colunas industriais varia entre 1,0 e 1,5 metros<sup>(32,38,39,52)</sup>. Os dados de escala de laboratório têm sido reportados na faixa entre 0,3 e 1,0 metros<sup>(29,45,51,52)</sup>.

Não existem regras gerais com respeito a altura ou profundidade da espuma. Se o arraste hidráulico é o único problema, então alturas pequenas de espuma podem ser suficientes, já que o arraste parece ser eliminado em

torno da interface polpa-espuma quando se opera em velocidades mais moderadas de gás ( $Jg^* < 1,5 \text{ cm/seg}$ )<sup>(52)</sup>.

Se é necessária a seletividade (aumento em teor) das espécies hidrofóbicas na espuma, ou se usam velocidades de gás mais elevadas ( $Jg^* > 2 \text{ cm/s}$ ), então é desejável usar alturas de espumas maiores<sup>(52)</sup>. Ambas as soluções são muito facilmente exequíveis e controláveis em sistemas de flotação em colunas.

#### 6.4. Tempo de Residência

A recuperação de espécies úteis é governada pelo tempo médio de residência das partículas sólidas. Para colunas industriais, o tempo médio de residência do líquido ( $\tau$ ) varia normalmente entre 12 e 20 min.; enquanto que para colunas de laboratório,  $\tau$  varia entre 0,5 e 14 min. O valor do tempo de residência do líquido (ou polpa), pode ser estimado como a razão entre o volume efetivo do líquido (ou polpa) na zona de recuperação, e o fluxo volumétrico do rejeito (T);

$$\tau = \frac{Ac.H.(1 - \epsilon_g)}{(10T)} \quad (16)$$

onde:  $Ac$  é a seção transversal da coluna ( $\text{cm}^2$ )

$H$  = representa a distância desde o nível de entrada de ar até a interface polpa-espuma (geralmente  $H=10-12$  metros)

$\epsilon_g$  = é a fração volumétrica de gás ( $^{\circ}/1$ ).

Em uma coluna de flotação, o tempo médio de residência das partículas,  $\tau_p$ , aumenta inversamente com o tamanho das partículas, aproximando-se ao tempo médio de residência do líquido,  $\tau_p$  (min) depende da velocidade de sedimentação das partículas ( $U_p$ ) e da velocidade intersticial do líquido ( $U_i$ )<sup>(46,54)</sup>.

$$\frac{\tau_p}{\tau} = \frac{U_i}{(U_i + U_p)} \quad (17)$$

onde:  $U_p$  = é a velocidade de sedimentação de partículas em presença de um fluxo alto de bolhas e de partículas. A equação de Masliyah<sup>(55)</sup>, pode ser usada para estimar  $U_p$ .

Como exemplo, para  $U_t = 1 - 2$  cm/s (razão típica de velocidade descendente do líquido), o  $\tau_p$  de partículas de  $120 \mu\text{m}$  ( $\rho_s = 4,0 \text{ g/cm}^3$ ), é 60% do  $\tau$  do líquido<sup>(46,54)</sup>.

### 6.5. Altura da Coluna

A altura  $H_1$  ( Figura 1 ), como também a razão  $H_1/D$ , tem um efeito significativo no comportamento metalúrgico da coluna<sup>(55)</sup>.

A recuperação do mineral cresce ao aumentar a razão  $H_1/D$  para um volume de coluna e vazão de alimentação constantes, enquanto que o teor de concentrado diminui em menor proporção.

Colunas de 10-15 mts. de altura com  $H_1/D \approx 10$  são adequadas para processar vazões de alimentação entre 9 - 36 m<sup>3</sup>/h. A razão  $H_1/D$  máxima, está determinada pela capacidade de transporte do gás, uma consideração importante para unidades piloto, onde  $H_1/D \rightarrow 200^{(55)}$ .

A altura total da coluna, H (m), requerida para uma operação comercial, pode estimar-se como:

$$H = H_1 + 2 \quad (18)$$

onde se inclui o tamanho requerido para coleta ( $H_1$ ), mais uma provisão de 1,5 metros para altura de espuma e 0,5 mts. abaixo do distribuidor de gás (ou ar).

#### 6.6. Bias

A ação de limpeza (eliminação das partículas arrastadas hidraulicamente), está baseada na existência de um fluxo líquido descendente de líquido na zona de espuma. Isto se consegue mantendo um fluxo volumétrico de rejeito (T) maior que o fluxo de alimentação (F). Uma forma de controlar isto, é mantendo uma diferença constante (bias positivo), segundo:

$$B = T - F > 0 \quad (19)$$

Na prática industrial, se usam valores de  $J_b$  entre 0,1 e 0,6 cm/s (neste caso,  $B = 0,06 \cdot J_b \cdot A_c$ ).

Uma segunda forma de controle, é manter uma razão constante (maior que uma unidade) entre os fluxos volumétricos de rejeito e alimentação. Isto se chama Razão de BIAS (BR), ou seja:

$$BR = T/F > 1 \quad (20)$$

Comumente, se recomendam valores para BR na seguinte faixa entre 1,01 e 1,15<sup>(31)</sup>. Entretanto, a operação da planta mostra as vezes faixas mais amplas (entre 1,01 e 1,50). esta dispersão em BR, pode explicar-se pelas diferentes estratégias de controle empregadas nas células de coluna de flotação.

Em resumo pode-se dizer que "bias" vem a ser a relação volumétrica entre a vazão de polpa no deprimido (rejeito) e a alimentação da coluna.

### 6.7 - "Hold - up"

O "Hold- up" da coluna de flotação pode ser definido como sendo a fração volumétrica da zona de recuperação ocupada pelo ar.

Quando se introduz em uma coluna de flotação uma certa quantidade de ar (ou gás), desloca-se a quantidade equivalente de água ou

polpa. A fração volumétrica deslocada é chamada de "Hold-up" ( $\epsilon_g$ ). O complemento ( $1 - \epsilon_g$ ) é o líquido ou polpa "Hold-up".

Segundo DOBBY<sup>(10)</sup>, existem várias formas de medição do gás "hold-up", entre elas apresentamos três (Figura 4). O método 1 mede o gás "hold-up" para todo o recipiente ("hold-up total"), enquanto os métodos 2 e 3 medem o "hold-up" em certa seção do recipiente ("hold-up local"). No método 2 a dada seção é definida pela distância entre os pontos de tomada de pressão; enquanto no método 3 ela é definida pelo par de sinais entre os sensores (absorção de raios - X). Os métodos 2 e 3 podem ser usados para medir a variação axial no gás "hold-up". O método 3 pode ser modificado para medir o gás "hold-up" para pontos específicos dentro da coluna.

No método 2, a pressão do método é selecionada para experiência. Este método é o mais simples; o método 1 por exemplo é impraticável com espuma, e o método 3 necessita calibração.

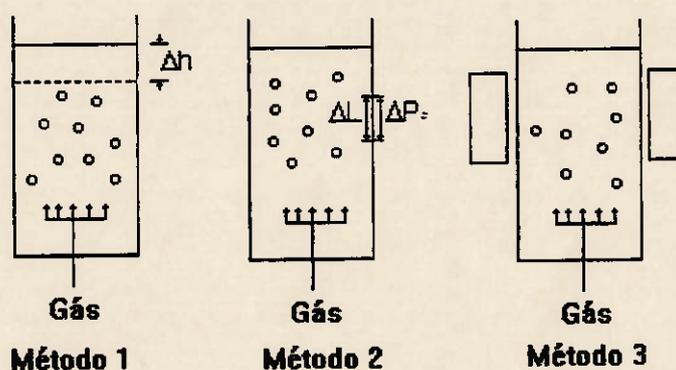


Figura 4 - Métodos de Medição do "Hold-up"

A teoria de medição do gás "hold-up" será apresentada a seguir. Será considerado o caso prático de gás- polpa. Para tomar a solução tratável é assumido que o componente dinâmico da pressão seja desprezível e que as bolhas são levemente carregadas e, conseqüentemente, a densidade do agregado bolha-partícula seja também desprezível. A pressão acima da atmosférica para A e B (Figura 5a) é dada por:

$$P_A = \rho_{sl}gL_A(1 - \varepsilon_{gA}) \text{ e } P_B = \rho_{sl}gL_B(1 - \varepsilon_{gB}) \quad (21)$$

Onde  $\rho_{sl}$  é a densidade da polpa e  $\varepsilon_{gA}$  e  $\varepsilon_{gB}$  são o gás holdup acima de A e de B respectivamente ( o produto  $L(1-\varepsilon_g)$  é o equivalente a altura de polpa sem gás). Portanto, a diferença de pressão entre A e B,  $\Delta P$ , é :

$$\Delta P = \rho_{sl}g\Delta L(1 - \varepsilon_g) \quad (22)$$

onde é  $\varepsilon_g$  é o gás holdup entre A e B. rearranjando,  $\varepsilon_g$  é dado por:

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl}g\Delta L} \quad (23)$$

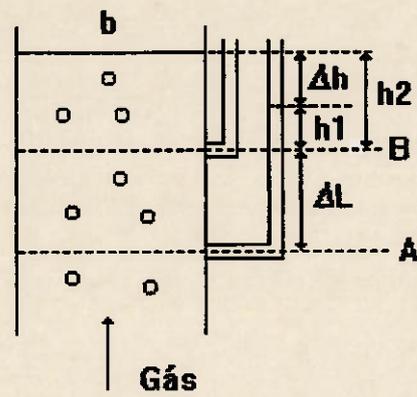
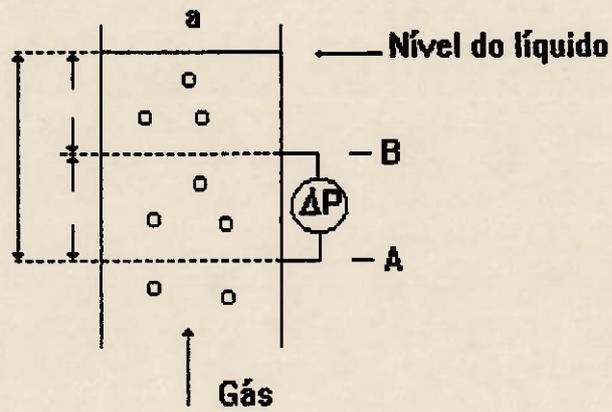


Figura 5 - Medição de gás "hold up" por diferença de pressão

(a) geral

(b) usando manômetros de água

Nota-se que  $\varepsilon_g$  é medido localmente acima da distância  $\Delta L$ , e que o gás "hold-up" em outras partes da coluna não é um fator. Com a repetição das medidas a medida para intervalos ao longo da coluna, o perfil de  $\varepsilon_g$  com a altura pode ser estabelecido.

Se os manômetros ocupados com água são utilizados para medir pressão (Figura 5b), temos:

$$P_A = \rho_w g (\Delta L + h_1) \quad (24)$$

$$P_B = \rho_w g h_2 \quad (25)$$

Com isso, temos a seguinte equação geral para a variação de pressão:

$$\Delta P = \rho_w g (\Delta L - \Delta h) \quad (26)$$

onde:  $\Delta h$  é positivo quando o nível do manômetro superior é mais alto do que o nível do manômetro inferior. (Quando  $\Delta h$  é positivo a densidade bulk da zona de coleta é menos do que a densidade da água; quando  $\Delta h$  é negativa a densidade bulk é muito maior que a da água).

Então,  $\varepsilon_g$  é dado por:

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_{sl}} \left( 1 - \frac{\Delta h}{\Delta L} \right) \quad (27)$$

No sistema de três fases é necessário conhecer a densidade de polpa entre as tomadas de pressão; a sensibilidade de  $\varepsilon_g$  para  $\rho_{sl}$  será discutida.

Considerar o caso onde a pressão é medida com manômetros de água, e é assumido  $\rho_{sl} = \rho_w$ . A equação (27) então reduz-se para

$$\varepsilon_g = \left( \frac{\Delta h}{\Delta L} \right) \quad (28)$$

Esta é a solução para um sistema gás-água. Com polpa, a equação (28) dá um "hold-up" aparente  $\varepsilon_{ap}$ . O "hold-up"  $\varepsilon_g$  é referido com  $\varepsilon_{ap}$  por:

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_{sl}} (1 - \varepsilon_{ap}) \quad (29)$$

Esta relação pode ser melhor entendida na Figura 6. Existe uma significativa diferença entre o "hold-up real e o aparente. Por exemplo, considerando o  $\rho_{sl} = 1,3 \text{ g/cm}^3$  (equivalente a 30% de sólidos em peso para calcopirita) onde um gás "hold-up" real de 20% seria lido com um "hold-up" aparente de -4%. O mesmo problema aparece se sensores de pressão são utilizados, temos pela equação (23) que assumindo-se para a calibração  $\rho_{sl} = \rho_w$ , então, para o exemplo acima, o "hold-up" aparente é calculado ser -4%.

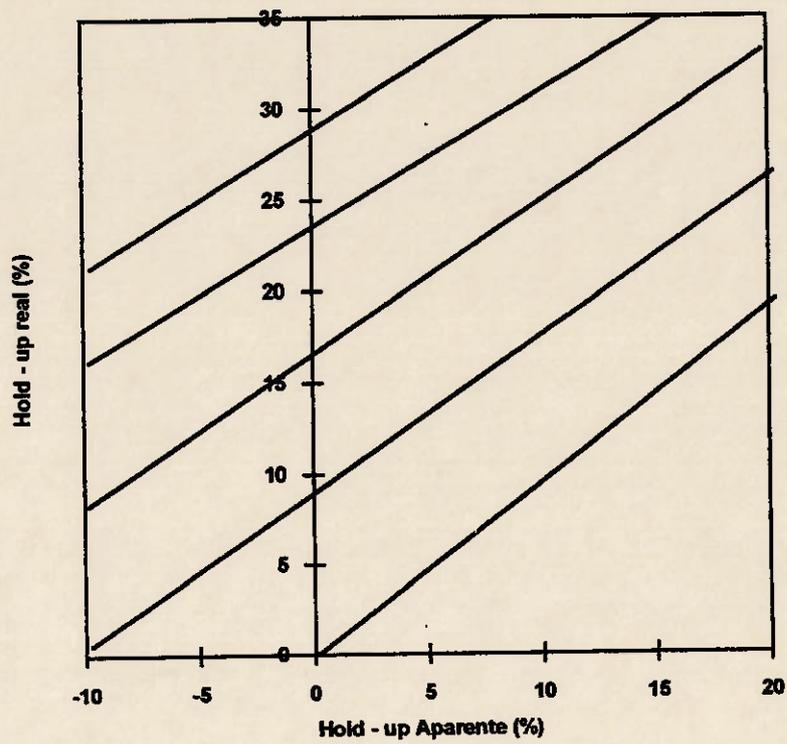


Figura 6 - Gás "Hold-up" Real x Gás "Hold-up" Aparente quando se se utiliza manômetros de água.

O exemplo utilizado foi extremo ( $\rho_{sl} = \rho_w$ ). É necessário conhecer  $\rho_{sl}$  se valores de gás "hold-up" são requeridos.

Em flotação o problema é favorecido desde a partição de sólidos entre a água e as bolhas. Isto pode introduzir uma variação axial em  $\rho_{sl}$ , e assumir a densidade zero para o agregado bolha-partícula pode ser inválido em alguns casos. Uma possível solução na planta é medir  $\Delta P$  acima de uma seção próxima ao fundo da coluna, onde as bolhas estão provavelmente sensivelmente carregadas, e usar a densidade do rejeito para estimar a densidade de polpa dentro da seção. Se os sólidos são mais grosseiros do que  $30 \mu\text{m}$  ( $d_{80}$ ) então correções para as relativas velocidades de queda das partículas e do líquido precisam ser realizadas (Dobby et al., 1988).

Os métodos manométricos tem alguns problemas práticos. As bolhas e as partículas sólidas podem entrar no braço do manômetro se precauções não foram tomadas. Em um sistema gás-líquido as bolhas podem ser excluídas seja por um "plug" poroso (palha de aço) ou pela correção do braço para um pequeno ângulo para a coluna. Em um sistema gás-polpa os sólidos podem ser eliminados pela manutenção de um pequeno fluxo descendente de água. Em colunas laboratório/piloto o cuidado requerido garantiu que este fluxo de água através de manômetros não representam um proporção significativa da água total entrando na coluna.

## 6.8 - Percentagem de sólidos na alimentação

Em virtude da eficiente ação de limpeza produzida pelo efeito combinado entre qualidade da espuma e bias positivo que caracterizam sistemas de flotação em colunas, se pode utilizar uma alta percentagem de sólidos (30 a 50%) na polpa de alimentação da coluna, sem afetar apreciavelmente o teor do concentrado. Por outro lado, a capacidade de transporte das bolhas sempre constituirá um fator limitante, especialmente em sistemas que estejam operando com partículas ultrafinas ( $<10 \mu\text{m}$ ) e que requerem uma alta recuperação de sólidos no concentrado, tais como em operações de limpeza via flotação em coluna.

## 6.9. Tamanho da Bolha

O tamanho da bolha<sup>(2)</sup>, é considerado um fator de controle para a eficiência metalúrgica no processo de flotação, devido as seguintes razões:

i. Para um fluxo de ar constante ( litros/minuto ), à medida que o tamanho das bolhas diminui, sua superfície específica aumenta proporcionalmente, isto é, a área superficial da bolha por unidade de volume aumenta na razão inversa de seu diâmetro. Assim sendo, para uma quantidade definida de volume de ar, existirá sempre uma maior superfície de bolhas pequenas disponíveis, para a flotação das partículas minerais, sobretudo se considerarmos que as colisões, entre partícula/ bolha e posterior ascensão das partículas sólidas em alcançar a fase de espuma,

dependem diretamente da superfície total de bolhas disponíveis no processo de flotação.

ii. Quando as bolhas ascendem à camada de espuma ( Zona de Limpeza ), arrastam consigo material que tem propriedades hidrofílicas (que normalmente, não deveriam flotar), produzindo-se um arraste mecânico do mesmo no concentrado. Quanto maior for o tamanho das bolhas, mais rápida e maior será a quantidade de material hidrofílico arrastado para a Zona de Limpeza (efeito denominado de *arraste hidráulico*);

iii. A teoria hidrodinâmica que é aplicável ao movimento das bolhas, partículas e agregados bolha/partícula, sugere que as partículas mais finas jamais poderão colidir com as bolhas de maior diâmetro (e portanto, não poderão flotar com as bolhas grandes), porque as partículas finas, devido a sua pouca massa, não deverão se desviar de sua linha de corrente (seguindo normalmente para a fase líquida, que se desvia bordeando a bolha em seu percurso), sendo portanto deslocadas para fora da área de influência da trajetória das bolhas, quando estas sobem para a fase de espuma.

De acordo com o que foi descrito, a geração de bolhas pequenas (entre 0,5 e 1,0 mm de diâmetro), denominadas *microbolhas*, constituem um importante fator para o bom desempenho de uma célula de coluna, especialmente na recuperação de partículas finas (granulometria entre 0,104 e 0,074 mm).

Na flotação convencional, e também em alguns casos na coluna, se produzem bolhas de grande diâmetro (entre 2 e 5 mm, com um tamanho médio de 3 mm), e com isso fazendo com que os resultados metalúrgicos sejam desfavoráveis. À maneira do exemplo, nas colunas do tipo "home-made" que são utilizadas em diversos circuitos industriais de flotação no Canadá (tais como Gibraltar, Lornex e outras, em British Columbia), se costuma revestir com tela de filtro os distribuidores de ar localizados no fundo da coluna, devido ao baixo custo e facilidade de confecção destes dispersores. O tamanho da bolha produzido nestes borbulhadores (3 a 4 mm), é geralmente muito grande para produzir boas recuperações de espécies úteis nos respectivos concentrados de flotação em coluna, considerando que a seletividade do processo quase sempre supera uma flotação convencional. Mais ainda; se, no intento de melhorar as recuperações, injetar-se um fluxo maior de ar na coluna (mantendo, não obstante, um diâmetro de bolha  $\geq 3$  mm), assim mesmo se aumentará o grau de turbulência dentro do equipamento, desestabilizando sua operação normal e afetando negativamente os resultados metalúrgicos obtidos<sup>(3)</sup>. DOBBY; FINCH; YIANATOS<sup>(49,53)</sup>, afirmaram que os borbulhadores empregados na flotação em coluna deveriam ser desenhados com um duplo propósito:

- i. Produzir bolhas de tamanho pequeno (microbolhas); e
- ii. Gerar velocidades superficiais de gás elevadas (suficientes para transportar as partículas minerais coletadas para a fase de espuma e maximizar assim mesmo a velocidade de coleta das partículas, mas

evitando-se simultaneamente de produzir um grau excessivo de turbulência dentro da célula de coluna).

Segundo WHEELER<sup>(3)</sup>, uma coluna de 36" x 36" (seção transversal quadrada), deveria requerer um fluxo máximo de ar de 40 pés<sup>3</sup>/min (nas CNTP), sendo um valor usual de 32 pés<sup>3</sup>/min. Logo o requerimento de ar unitário deveria ser de 3,6 pés<sup>3</sup>(std)/min/pés<sup>2</sup> de área transversal da coluna, obtendo-se uma velocidade superficial do gás,  $J_g^* = 1,83$  cm/s (nas CNTP). O mesmo autor assinala que uma coluna de fabricação caseira ("home-made") de 36" de diâmetro, que emprega normalmente uma tela de filtro como difusor poroso, utilizará em torno de 7,1 pés<sup>3</sup>(std) de ar/ min/pés<sup>2</sup> de área (gerando bolhas de em média 3 mm de diâmetro), para obter a capacidade adequada de aumento do concentrado mediante bolhas de maior diâmetro. Em outras palavras, só a ação de gerar bolhas de 3 mm de diâmetro no lugar de microbolhas ( $d_b \leq 1$  mm), implicará em um consumo dobrado de ar requerido (desde 3,6 a 7,1 pés<sup>3</sup> de ar/ min/pés<sup>2</sup> de área), para isso excedendo-se a cota máxima de velocidade superficial de ar permitida ( $J^* = 3$  cm/s) e violando assim a condição de transporte em fluxo laminar requerido na coluna (a menos que se utilizem "baffles")<sup>(11)</sup>.

Existem vários mecanismos para geração de bolhas<sup>(2)</sup>, sendo que entre os procedimentos mais conhecidos atualmente para flotação em coluna, destacam-se os seguintes, com suas características mais importantes:<sup>(29,102)</sup>

i. Geração eletrolítica de microbolhas, tal como é utilizada em algumas estações de tratamento de água, trata-se de um processo de alto

custo por requerer um alto consumo de energia e ainda demandar adição de sais para melhorar a condutividade elétrica da solução aquosa. Por se tratar de um processo que produz gases inflamáveis ( $H_2$  e  $O_2$ ), requer também cuidados especiais de segurança.

ii. Injeção mecânica de ar constitui um processo que apresenta "modus operandi" bastante simples e de baixo custo operacional se comparado aos demais. Tal procedimento demanda tanques apropriados para armazenar ar e conexões para transportá-lo em estado líquido até os aeradores/borbulhadores. Dependendo do menor diâmetro que se pretende produzir, o processo pode tanto requerer elevadas proporções de agentes tensoativos para rebaixar a tensão superficial da interface líquido/gás e estabilizar as bolhas de menor diâmetro, como requerer elevadas proporções de "fluxo de água/ fluxo de ar" para gerar o tamanho de bolha desejado.

iii. A dissolução de ar sob pressão é um processo muito simples, de fácil operação e baixo custo. Talvez sejam estas as razões para seu uso ser tão generalizado nas estações de tratamento de água. Requer a adição de tensoativos para prevenir a coalescência das bolhas geradas e, como consequência, aumento indesejado de seu diâmetro.

O controle efetivo do diâmetro das bolhas geradas através dos processos de geração de bolhas acima descritos demanda o uso de difusores porosos através dos quais o fluxo de ar que alimenta o sistema de flotação em coluna é forçado atravessar. Tais dispositivos possuem uma grande aplicação na atualidade, sendo de uso comum na maioria das colunas de flotação. São confeccionados de uma grande variedade de materiais (leitos de borracha, cerâmica e aço inox, ou ainda telas de polietileno, teflon etc.), onde a regulagem do diâmetro das bolhas ocorre mediante o tamanho de seus poros e a adição controlada de agentes tensoativos. A tabela 2, aponta os principais materiais hoje utilizados em circuitos piloto e industrial de flotação em coluna.

Tabela 2 - Características de Alguns Materiais Constituintes de Aeradores.

Materiais	Menor Diâmetro de Bolha Produzido	Vantagens	Desvantagens
	(mm)		
Aço Inox	0,5 - 1,5	1. Alta durabilidade; 2. Resistência a grandes pressões de ar.	1. Fácil entupimento; 2. limpeza periódica.
Tela de Filtro	2,0 - 4,0	1. Baixo custo; 2. Fácil fabricação; 3. Maior tempo de uso contínuo.	1. Após entupimento, devem ser trocadas; 2. Exigem uso de tensoativos para redução do diâmetro das bolhas
Borracha	0,6 - 3,0 (*)	1. Possibilidade de auto-limpeza com controle da pressão.	1. Entopem com facilidade; 2. Difícil limpeza (**); 3. Se deformam com altas pressões de ar.

(\*) Estes tipos de borbulhadores não resistem a grandes pressões de ar, produzindo geralmente bolhas grandes (os de fabricação caseira entre 1,5 e 3,0 mm; excetuando os da CFCC ( Column Flotation Co. of Canada Ltd) que produzem bolhas entre 0,6 e 0,7 mm)<sup>(3)</sup>.

(\*\*)São difíceis de limpeza, devendo geralmente se desmontar a coluna para sua limpeza (com as conseqüentes perdas em produção). Na planta de beneficiamento de cobre de Opemiska (Canadá)<sup>(11)</sup>, se reportou que estes difusores, se bloqueavam a uma taxa de 0,14 lb/pol<sup>2</sup>/ dia, sendo não obstante melhores que os de aço inox, polietileno, teflon e cerâmica, experimentados anteriormente na mesma planta, que se bloquearam em um tempo mais reduzido ( a taxa de bloqueio era então de 1,0 lb/pol<sup>2</sup>/dia). O próprio pessoal da Opemiska, encontrou que se manteria um valor aceitável do  $\Delta P$  de ar através dos borbulhadores ( $\Delta P \cong 7,0$  lb/ pol<sup>2</sup>), a flexibilidade da borracha ao redor dos poros, proporciona por si mesma uma ação de auto-limpeza do borbulhador, evitando assim o bloqueio de seus poros;

A nível piloto e industrial, os mecanismos<sup>(2)</sup> de geração de bolhas mais empregados, são os seguintes:

i. Uso de difusores porosos de tela de filtro, de borracha e/ou de aço inox (já comentados), que produzem as bolhas dentro da própria célula de coluna (uma grande quantidade de bolhas relativamente pequenas, produzidas pelo distribuidor de ar instalado no fundo do equipamento);

ii. Sistemas externos de geração de bolhas, entre os quais se destacam os seguintes:

- sistema Deister de aeração aspirada (célula Flotaire<sup>(16)</sup>) que será vista com detalhes mais adiante.

- sistema ARMCO (patente do USBM)<sup>(29)</sup>

No primeiro caso (célula Flotaire), a Deister concentrator Co. Inc. utiliza um sistema de ar aspirado pela pressão de entrada da água, para a geração de bolhas em suas células de colunas, este sistema será dado mais atenção mais adiante quando se apresentar os principais tipos de colunas existentes atualmente.

- No sistema ARMCO (patenteado pelo USBM em 1987)<sup>(96)</sup>, se utiliza um gerador de bolhas externo a coluna, empregando-se um mecanismo combinado de dissolução de ar sob pressão, e geração mecânica para produzir o tamanho de bolha requerida (Figura 7).

De acordo com FOOT (um dos inventores do novo gerador)<sup>(96)</sup>, pode se produzir com este sistema, bolhas de tamanho distinto (desde  $0,2 \text{ mm}$  até  $4 \text{ mm}$ ). Para isto, bastará regular os fluxos de ar e água (que são alimentados na unidade através de locais separados), junto com uma pequena quantidade de reagente espumante (inferior a  $13 \text{ ppm}$ ).

O gerador de bolhas (que é confeccionado em "plexiglass" ) consta de uma câmara de mistura (ar/água) pressurizada, que se encontra equipada com um mecanismo de injeção de ar ( ou outro gás), o que permite controlar o tamanho de bolhas desejado, nos níveis assinalados anteriormente.

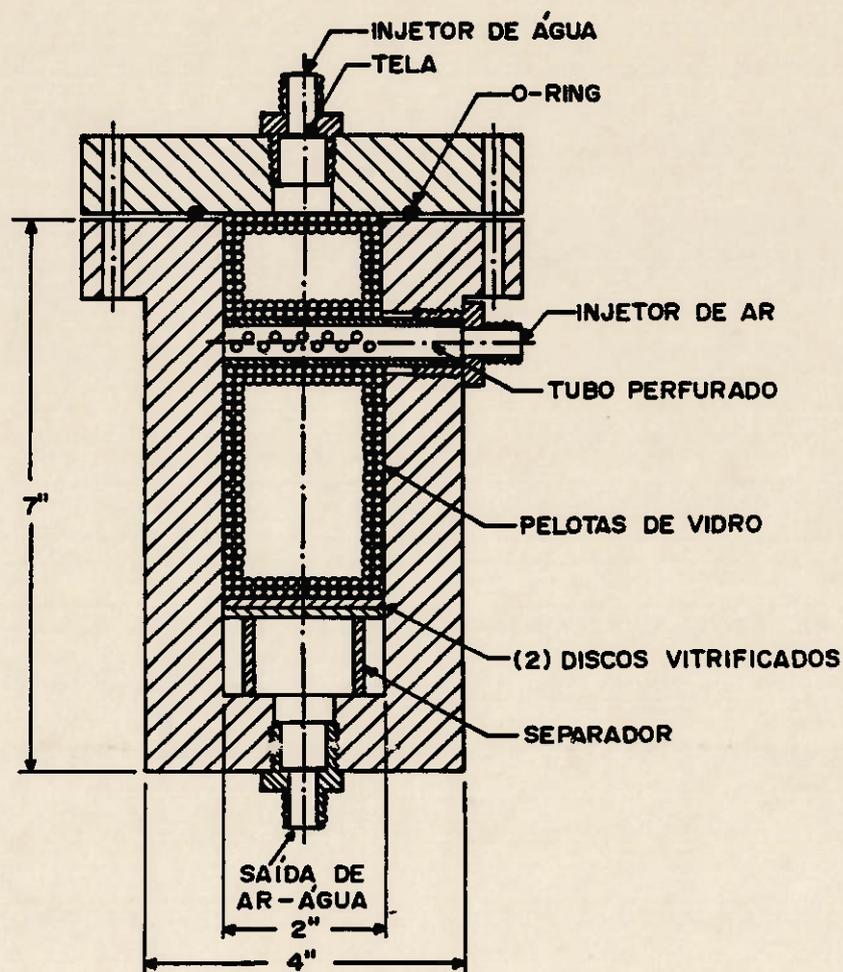


Figura 7 - Sistema Esquemático da Câmara de Mistura (ar-água) pressurizada, no sistema externo de geração de bolhas desenvolvido pelo U.S.B.M.

FOOT<sup>(96)</sup>, afirma que este é o primeiro mecanismo externo de geração de bolhas, que permite controlar amplamente o tamanho de bolha requerido. Com este sistema, se deseja obter frações volumétricas de ar muito maiores na célula em coluna, e se utilizam dosagens de reagente surfatante bastante inferiores, comparandos com aqueles dos sistemas convencionais de geração de bolhas. Tanto o ar como a água são unidos a pressão dentro da câmara de mistura, na qual são colocados esferas de vidro ou quartzo moído (ambos em forma compactada) para favorecer o contato ar-água. Tanto o fluxo de água como o de ar são controlados mediante válvulas localizadas no topo da unidade, enquanto que o ar sob pressão é injetado através da porta lateral. a mistura pressurizada ar-água, depois de haver permanecido um tempo prudente dentro da câmara de contato para dissolver o ar contido, sai da unidade através de uma pequeno tubo localizado no fundo do gerador de bolhas, e dali as bolhas são injetadas dentro da célula de coluna. No suposto caso que de se querer obter microbolhas de 0,6 a 0,7 mm de diâmetro, deverá se operar com pressão de ar em torno de 60 psi. Neste último caso, se deverá introduzir um excesso de ar na câmara de mistura pressurizada para evitar a dissolução completa do mesmo na fase líquida. Se emprega para tanto neste caso, um mecanismo combinado de geração de microbolhas via dissolução do ar sob pressão e indução mecânica, requerendo-se pequenas doses de espumante para estabilizar as microbolhas e evitar sua coalescência. O volume de câmara de mistura é de 18,9 pol<sup>3</sup>, dispondo -se de 3 peneiras de 0,589 mm colocadas nas entrada da água e ar, e na saída da mistura ar-água (bolhas) do sistema, para evitar perdas das esferas de vidro. Existe ainda um separador ( de 1" de espessura) com um disco de vidro perfurado (frita de vidro) em sua parte superior (topo do separador),

que está instalado na parte inferior da câmara de dissolução sob pressão, para evitar "curtocircuito" de ar dentro da câmara de mistura pressurizada. Na Figura 7, está esquematizada a câmara de mistura ar/ água do sistema gerador de bolhas desenvolvido por USBM (29,96).

FOOT afirma que a manutenção do borbulhador pode realizar-se sem necessidade de deter a operação da coluna, já que constitui um sistema externo a mesma. Os componentes do sistema podem ser isolados facilmente entre si, incluindo os injetores ( aberturas pequenas de injeção de ar na coluna), que podem ser retirados do equipamento provocando só uma perturbação mínima do processo de flotação em coluna. O sistema em referência já foi experimentado com êxito em distintas operações comerciais de flotação em coluna ( minerais de cromita de Montana (EUA); mineral de manganês, cobre, molibdênio e metais preciosos de Utah e Nevada, fosfatos da Flórida, minas de chumbo-zinco,etc.).

Na maioria das aplicações citadas<sup>(96)</sup>, se já obtido melhoras notáveis tanto em teor como recuperação das espécies úteis via flotação em coluna, comparadas com os respectivos resultados de flotação convencional.

De acordo com FOOT, o sistema externo de geração de bolhas, possui as seguintes vantagens sobre os outros sistemas convencionais que atualmente se comercializam a nível industrial:

- controle melhorado do tamanho da bolha, em um limite bastante amplo ( desde bolhas grandes a microbolhas)

- baixas dosagens de reagente surfatante (espumante).
- construção e operação muito simples.
- baixo custo de construção.
- sistema externo de geração de bolhas.
- adaptação fácil a processos de flotação em coluna e convencional, tratamento de águas e outras aplicações industriais.

## 7. EQUIPAMENTOS QUE UTILIZAM OS PRINCÍPIOS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO

Tomando como base os princípios do modelo original da coluna de flotação, vários equipamentos foram desenvolvidos visando seu aprimoramento e/ou adaptação a aplicações específicas. O presente capítulo procura apresentar as contribuições mais relevantes.

### 7.1. CÉLULA JAMESON<sup>(70,103,104,105,106)</sup>

A célula Jameson é uma das maiores e mais recentes inovações em equipamentos de flotação que utilizam os princípios da coluna tradicional. Ela foi projetada por GRAEME JAMESON, professor do Departamento de Engenharia Química, da Universidade de Newcastle, na Austrália. Tal equipamento foi concebido a partir de estudos que buscavam métodos mais efetivos de injeção e aspensão de ar em sistemas de flotação em coluna tradicional com minério de chumbo/zinco da mina de Mount Isa em Queensland- Austrália.

Nesta célula (Figura 8), tanto a alimentação do minério como o ar são introduzidos no centro da célula através de um tubo vertical que é chamado peculiarmente de "downcomer". Este sistema misto parece ser uma das maiores inovações do equipamento. O mineral entra no sistema através do "downcomer" em forma de um jato de polpa. O movimento descendente da polpa cria uma pressão negativa que succiona o ar através do "downcomer" de modo muito semelhante à ação de um êmbolo. Com isso, uma grande quantidade de bolhas de ar são

arrastadas junto com o líquido e colocadas em contato com as partículas minerais hidrofobizadas já na etapa de alimentação da polpa no sistema. A turbulência da polpa em sua trajetória descendente através do "downcomer" constitui um excelente meio de proporcionar maior probabilidade de contato entre partículas e bolhas, assim como para evitar segregação de polpa na tubulação.

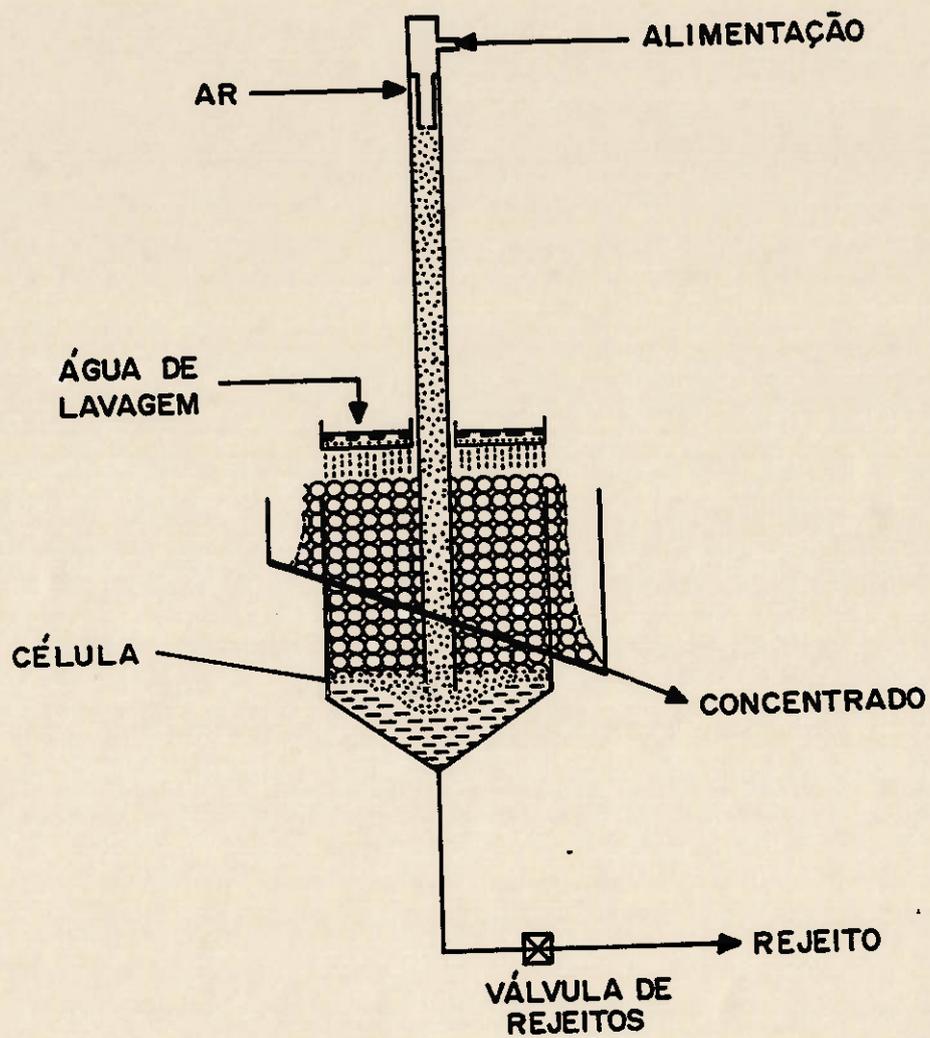


Figura 8 - Célula Jameson

A principal diferença entre a célula Jameson e a célula de coluna convencional reside na maneira como a polpa e o fluxo de ar se movimentam no interior do equipamento. Na coluna convencional, as partículas descem bem lentamente ao longo da coluna sob ação da gravidade e as bolhas sobem, levitando em contra-corrente. O contato partícula/bolha ocorre em ambiente pouco turbulento que caracteriza a "Zona de Recuperação". No caso da célula Jameson, as bolhas obrigatoriamente seguem a trajetória descendente da polpa ao longo do "downcomer" e, somente após terem atingido a base do cilindro é que iniciam sua trajetória ascendente. Neste caso, muitas das bolhas já se encontram mineralizadas, pois o contato partícula/bolha ocorre predominantemente ao longo da trajetória descendente no "downcomer". A velocidade de descida da mistura ar/polpa ao longo do "downcomer" pode ser escolhida de tal forma que se otimize o desempenho do processo através de um balanço entre as forças que promovem a levitação das bolhas versus a força de arraste do líquido descendente sobre as mesmas bolhas. Em consequência disto, em condições ótimas de operação, cria-se um espaço no qual 60% do volume é ocupado pelas bolhas de ar e 40% pela polpa mineralizada.

As partículas minerais, nesta situação, não demoram muito tempo para encontrar uma interface líquido/ar ( bolhas ) para que ocorra o fenômeno da coleta ( adesão partícula/bolha ), resultando disso uma taxa de coleta muito rápida de partículas por bolhas ao longo do "downcomer".

A polpa, ao sair do "downcomer", atinge um reservatório que constitui o fundo da célula. Isso é necessário para que as bolhas iniciem

sua trajetória ascendente rumo a uma camada de espuma que se forma no topo da célula e cujas características são muito semelhantes às da Zona de Limpeza de uma coluna convencional. A espuma enriquecida com partículas de espécies minerais que se deseja flotar é removida por transbordo ao longo das bordas do lavador como concentrado; enquanto que o rejeito é descartado pelo fundo da célula.

A célula Jameson é projetada usualmente com 1 metro de altura para proporcionar uma camada de espuma com espessura competente para fazê-la atuar como uma Zona de Limpeza. Outra característica importante é existência de um controlador de nível ( pneumático convencional de pressão ), utilizado para funcionar como uma válvula estabilizadora/controladora de nível; o que proporciona maior estabilidade ao circuito, além de permitir que se instalem sistemas automáticos de controle operacional.

A velocidade ascendente do fluxo de ar pode ser controlada, de acordo com o tipo de mineral com que se trabalha, isto é, baixas velocidades para material muito fino ou para operações de limpeza; assim como velocidades relativamente mais altas para partículas grosseiras.

A lavagem de espuma é possível como nas colunas convencionais. Uma das características principais desta nova célula é que a região onde ocorre coleta ( Zona de Recuperação ) foi dispensada, pois fica no interior do "downcomer" e por isto a célula é pequena.

A altura da coluna é muito reduzida quando comparada com as colunas convencionais, entretanto ela é similar à das células mecânicas. Com isso, células Jameson podem ser inspecionadas muito mais facilmente, isto é, do mesmo modo que as células mecânicas - o que não ocorre em uma coluna tradicional que apresenta altura de 10 m. Esta característica da coluna convencional desestimula inspeções mais freqüentes.

Uma outra característica importante é que a aspiração do ar é automática, não sendo necessário com isto o uso de compressores. O próprio mecanismo de introdução de polpa na célula já é capaz de aspirar naturalmente o seu próprio ar para o sistema, economizando em consequência desse fato 50% do custo operacional que normalmente seria gasto em uma coluna convencional. O tempo de residência é significativamente mais baixo na célula Jameson, com as partículas gastando de 10 a 12 segundos no "downcomer" quando as bolhas ficam completamente mineralizadas, com uma recuperação semelhante das colunas convencionais, onde o tempo de residência médio destas últimas é cerca de 20 min.

Uma das primeiras experiências com a célula Jameson foi realizada com o minério de potássio da planta de beneficiamento da empresa Cleveland Potash Ltd., da Inglaterra. Com a lavagem da espuma com uma solução de salmoura, o teor do concentrado melhorou na fase de limpeza, graças a rejeição da halita (NaCl). O sistema também serviu para as lamas da flotação "rougher" e atingiu um teor de 53% de KCl com uma recuperação de 73%.

Desde 1985<sup>(106)</sup>, quando os experimentos iniciaram com a célula Jameson foram realizados vários ensaios nas Minas Mount Isa Ltd. (planta de concentração de chumbo/ zinco), chegando-se a teores de concentrados de 65% de chumbo, 5% de zinco e 5% de ferro. Com as células mecânicas os teores eram de 55% de chumbo e 10% de zinco.

Nas minas de carvão de Newlands, em Queensland, a taxa de fluxo do "overflow" descarregado é de 1250 m<sup>3</sup>/h e contém 5 a 8% de sólidos com 15 a 45% de cinzas. Com dois estágios de flotação, o sistema Jameson superou as células de flotação convencional. Esse circuito, desde então, tem recuperado mais de 92% de material combustível.

A Peko Mines opera uma planta de beneficiamento de minério de cobre em Warrego, no norte da Austrália. O minério de cobre é a calcopirita (34% de cobre com pirita). O concentrado era produzido com cerca de 23% de cobre. Com a introdução da célula Jameson, o teor subiu para 30% de cobre sem alterações significativas de recuperação.

O uso da célula Jameson com tipos variados de minérios é matéria de estudos em vários países, incluindo o Canadá, Estados Unidos, Chile, Europa e África.

## **7.2. COLUNA EMPACOTADA ("PACKED COLUMN")<sup>(66,103,107,108)</sup>**

A coluna de flotação empacotada ("packed column"), apresentada na Figura 9, foi desenvolvida pela Michigan Technological University e é outra variante do conceito de coluna de flotação.

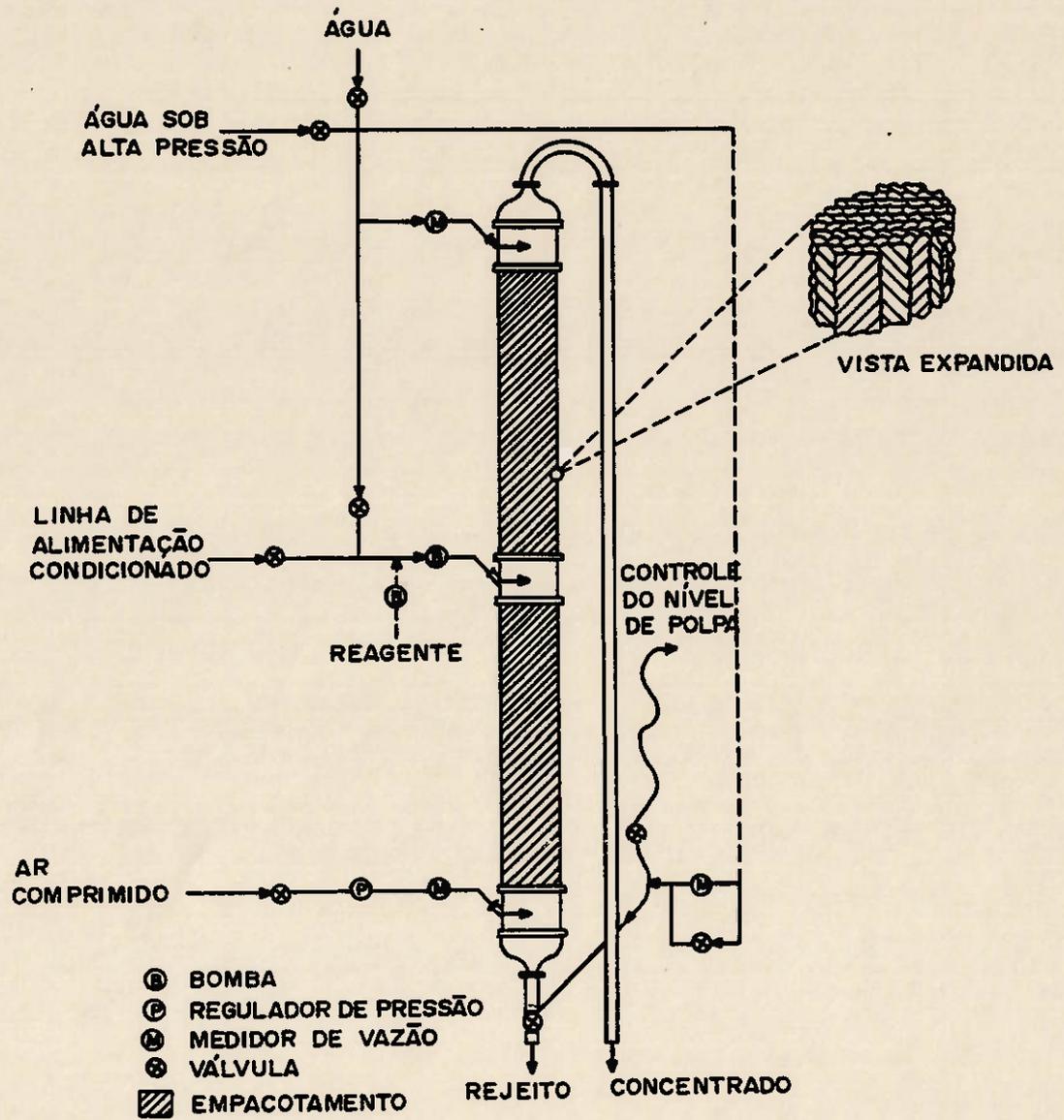


Figura 9 - Coluna Empacotada ("Packed Column")

A primeira aplicação de sucesso deste sistema foi no beneficiamento de taconito não magnético de Michigan que permitiu sua concentração em apenas um estágio, sem prévia deslamagem e com significativa melhora no desempenho do processo. Inicialmente, foram realizados ensaios em laboratório que alcançaram concentrados de ferro com teores acima de 66%. Isto representou uma recuperação acima de 85% para um minério que foi moído 80% abaixo de 500 malhas (25  $\mu$ m) para liberação. Com esses resultados promissores, foram conduzidos ensaios em planta piloto, usando o minério de ferro de baixo teor não-magnético como material de alimentação. A Tabela 3, mostra a comparação entre os resultados de "scale-up" da flotação de taconito não-magnético em planta piloto, entre a célula da coluna empacotada e a célula convencional.

Tabela 3- Resultados de "Scale-up" da flotação de taconito não magnético

	Concentrado de taconito			Nº de estágios
	% Fe	% Peso	% Fe recup.	
Coluna empacotada	67,0	43,3	81,3	1
Célula Convencional	66,8	25,5	46,8	8

A flotação de minérios de cobre, como correntemente realizadas, usa células mecanicamente agitadas muito grandes. Estas células geralmente exibem pobre seletividade para partículas abaixo de 0,044 mm.

Utilizando o sistema da coluna empacotada e mantendo a qualidade do concentrado em torno de 26% em cobre, a recuperação

aumentava de 73,7%, quando utilizavam-se as células convencionais, para 95% no sistema de coluna empacotada. Caso fosse interessante manter a recuperação em 73,7%, o teor de cobre aumentaria para 35%. Estes resultados constituem prova bastante convincente da eficácia do novo equipamento.

### 7.3. COLUNA FLOTAIRE<sup>(65,79,80)</sup>

A primeira geração de equipamentos de coluna Flotaire foi comercializada em 1979, pela Deister Concentrator Co., Inc. que foi a empresa inventora do sistema de coluna pioneiro, sendo que o primeiro minério estudado foi o fosfato. A primeira instalação comercial de grande porte já utilizou a segunda geração do equipamento em 1985 e inicialmente tinha o objetivo de beneficiar minerais sulfetados e carvão.

A diferença primordial entre as duas gerações de coluna Flotaire (ou Deister) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Diferenças entre os dois principais tipos de equipamentos de coluna Flotaire

Tipo (geração)	Altura (m)	Diâmetro de bolha (mm)	Volume da célula (cm <sup>3</sup> )	Água de lavagem	Sistema de Aeração
1	3 - 5	0,05	23	Não	Simplex
2	6 - 15	0,05 - 0,1	70	Sim	Duplo

A primeira geração da coluna Flotaire operou principalmente para flotação de fosfato e outros óxi-minerais metálicos e não - metálicos que requerem condicionamento em altas porcentagens de sólidos com coletores do tipo ácidos graxo, sulfonatos ou aminas graxas. A água requerida (40 l/min) para aspiração de ar é útil para a diluição da polpa e adequar sua densidade tanto para a flotação quanto para a remoção dos rejeitos através de bombeamento.

Várias células de segunda geração iniciaram sua operação em 1986 e 1987 para a flotação de minerais de sulfeto , carvão e óxidos metálicos. Neste tipo de célula, a água de lavagem da espuma deve ser utilizada em uma taxa igual ao volume de água do "overflow" da espuma.

A Figura 10, apresenta o esquema de uma célula Flotaire de 1ª geração (altura média de 5 m.). Ela tem estrutura cilíndrica (2 a 4 m. de diâmetro). A polpa (geralmente de 55 a 70% de sólidos em peso) é alimentada pela parte superior, enquanto que pela parte inferior se alimenta a água e o ar em contra-corrente com a polpa. O reagente espumante se introduz junto com o ar, que é aspirado pela pressão de entrada da água. Este equipamento trabalha com pressões variando entre 30 e 40 psi, gerando com isto uma distribuição de bolhas pequenas, que atravessam a coluna sem produzir agitação ou turbulência, em velocidades mais lentas, aumentando assim a probabilidade de que as partículas minerais e as bolhas se unam e, após a formação do agregado partícula/bolha, não ocorra sua destruição ao longo de sua trajetória ascendente por obra da turbulência do meio.

Desde sua criação, a célula Flotaire sofreu várias modificações que foram implementadas pela Deister Concentrator Co.. O gerador de bolhas, por exemplo, foi modificado para distribuir as microbolhas geradas externamente direto de seu ponto de origem para a coluna por um tubo flexível.

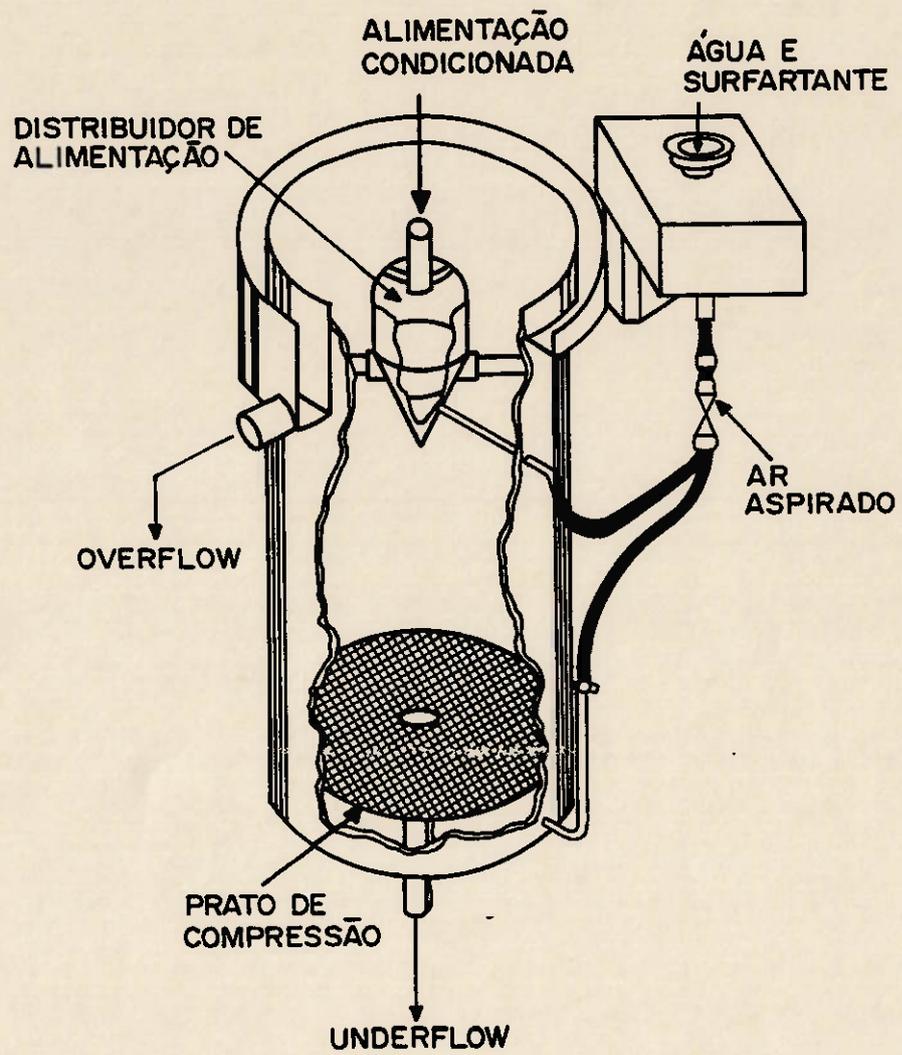


Figura 10 - Coluna Flotaire

Outras modificações significativas foram o uso da abertura no final do tubo flexível, que eliminou o problema de entupimento, que por vezes atingia os aeradores internos.

O sistema da lavagem giratória foi desenvolvida com o objetivo de melhorar a remoção e lavagem da espuma, particularmente no caso de colunas com diâmetro grande. Esse sistema é constituído de um braço com várias barras dotadas de "sprays" giratórios, montados acima do nível da espuma, pulverizam toda a superfície da espuma e são planejados para serem limpos sem remoção do braço giratório. Este sistema quando acoplado a pás curvadas, são capazes de remover mais efetivamente e mais rápido a espuma.

A célula Flotaire já tem sido utilizada no beneficiamento de fosfatos (Flórida, E.U.A.), assim como em alguns outros minerais (cobre, zinco, molibdênio, etc.). Até agora, a operação deste equipamento tem sido limitada aos E.U.A., Austrália, África do Sul e Chile.

No caso do fosfato da Flórida (E.U.A.), durante doze semanas, comparou-se o desempenho de 2 células Flotaire em série versus um banco de células mecânicas. As células Flotaire obtiveram um ganho médio de recuperação da ordem de 13,6% maior do que a produzida pelas células mecânicas, sendo que o teor foi semelhante ao concentrado "rougher" das células mecânicas. Na Tabela 5, é mostrada a recuperação metalúrgica obtida entre a célula Flotaire e as células mecânicas.

Tabela 5 - Comparação dos resultados metalúrgicos entre a célula Flotaire e a célula mecânica

Alimentação BPL(1)	Concentrado		% Recuperação	
	BPL		BPL	
	Flotaire	Mecânica	Flotaire	Mecânica
17,43 (2)	50,94	41,87	89,80	74,80
20,57 (3)	62,26	47,67	96,40	69,80
18,89 (3)	57,33	51,47	93,60	59,60
20,96	56,84	47,00	93,30	68,10

(1) BPL = Bone Phosphate of Lime ( $\%BPL = 2,185 \times \% P_2O_5$ )

(2) Alimentação fina ( 90% abaixo de 0,417 mm)

(3) Alimentação grosseira (50% abaixo de 0,417 mm)

Uma usina de beneficiamento de minério sulfetado de cobre do Arizona e do Novo México (E.U.A.), utilizam uma coluna Flotaire de 2,4 m de diâmetro e 12,2 m. de altura, no estágio de "scavenger" para recuperar cobre existente no rejeito "rougher". Esta coluna substituiu duas células mecânicas de 8,5 m<sup>3</sup> de volume. O teor do concentrado final para esta usina aumentou acima de 3% em cobre, enquanto a recuperação manteve-se a níveis prévios, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação de resultados entre a coluna Flotaire e células mecânicas para o estágio "scavenger" do minério sulfetado de cobre da região do Arizona e Novo México (E.U.A.)

Tipo de célula	Estágio "Scavenger" (Tempo em min.)	% em Cobre	
		Teor	Recuperação
Mecânica	6,4	0,98	19,6
Flotaire	5,9	3,54	33,0

No caso do minério de molibdênio, a célula Flotaire foi utilizada no estágio "rougher", no Arizona (E.U.A.) esta célula tem um diâmetro de 0,76 m e 7,3 m de altura. Uma célula em coluna convencional de 0,2 m de diâmetro e 7,3 m de altura foi utilizada como o primeiro "cleaner" para o concentrado Flotaire.

A recuperação do "rougher" de Molibdenita em média foi de 79,4%, enquanto a faixa limitante era de 66,5% a 90,2%. O teor "rougher" atingia 17,9% de  $\text{MoS}_2$  sendo a faixa limitante de 2,3 a 41,1% de  $\text{MoS}_2$ . A célula "cleaner" aumentou o concentrado Flotaire para valores entre 58 e 78% para recuperação entre 60 e 91%.

Outra aplicação da célula Flotaire para o molibdênio foi no estágio "rougher" do minério da região de Utah (E.U.A.). Uma célula Flotaire de 2,4 m de diâmetro por 12,2 m de altura foi utilizada no estágio "rougher", enquanto uma outra de 0,76 m de diâmetro por 7,6 m de altura foi utilizada para limpeza do concentrado "rougher". A comparação deste circuito com células "rougher" e "cleaner" é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação entre o circuito Flotaire e o circuito de células mecânicas ( "rougher" e "cleaner" ) para o minério de molibdênio de Utah (E.U.A.)

	Flotaire	Mecânica
	% MoS <sub>2</sub>	% MoS <sub>2</sub>
Alimentação	1,5	1,5
Conc. "Rougher"	21,8	9,2
Conc. "Cleaner"	38,1	14,1

#### 7.4. MICROCELL<sup>(80,103,109)</sup>

A incapacidade das células de flotação convencionais para recuperar finos de carvão de rejeitos com alto teor cinzas tem sido um problema para a indústria carbonífera. Para resolver este problema, o Virginia Centre for Coal and Mineral Processing (VCCMP) desenvolveu um novo equipamento de flotação, tomando como base os princípios da flotação em coluna convencional. A este novo equipamento, deu-se o nome de Microcell.

Esta inovação oferece como vantagem uma mais alta cinética de flotação, associada ao uso de microbolhas. A concepção do equipamento se originou de uma análise hidrodinâmica do processo de flotação, de onde se concluiu que, quanto menores forem as bolhas de ar existentes no sistema de flotação, maior será a eficiência da colisão com as partículas mais finas. A análise hidrodinâmica também sugeriu que o benefício trazido pelo uso de bolhas muito pequenas na flotação de partículas finas poderia ser consideravelmente melhorado se a flotação

fosse realizada sob condições de flotação mais tranquilas, o que é mais fácil ser obtido em uma coluna do que em uma célula de flotação mecânica. Além disso, a coluna permite um uso eficiente da água de lavagem o que é planejado para se minimizar o problema de arraste hidráulico encontrado no processo de flotação convencional.

O sistema Microcell foi planejado para tirar vantagem das altas taxas constantes de flotação obtidas com bolhas pequenas. Como é mostrado na Figura 11, a coluna Microcell consiste de três zonas, incluindo as seções de "rougher" , "scavenger" e "cleaner". A alimentação é introduzida acima do nível da polpa, e flui em contracorrente com as bolhas ascendentes na seção "rougher" da coluna. As bolhas carregadas entram na camada de espuma onde as partículas minerais são arrastadas e removidas pela água de lavagem. Então seção de espuma age como um estágio "cleaner". O material que se forma, segue dentro da seção para o fundo da coluna tornando-se parte da polpa reciclada que é bombeada através do gerador de bolhas para formar as microbolhas. No fundo da seção, o fluxo em contracorrente das bolhas e polpa produzem um contato íntimo entre as duas fases permitindo a recuperação do material. Como resultado, a seção de geração de bolhas tende a agir como um estágio "scavenger". Algum material que passe acima da seção de geração de bolhas deixa a coluna como rejeito. A taxa do fluxo de rejeito é utilizada para controlar o nível de polpa na coluna baseado nos sensores de pressão localizados próximos ao topo da polpa.

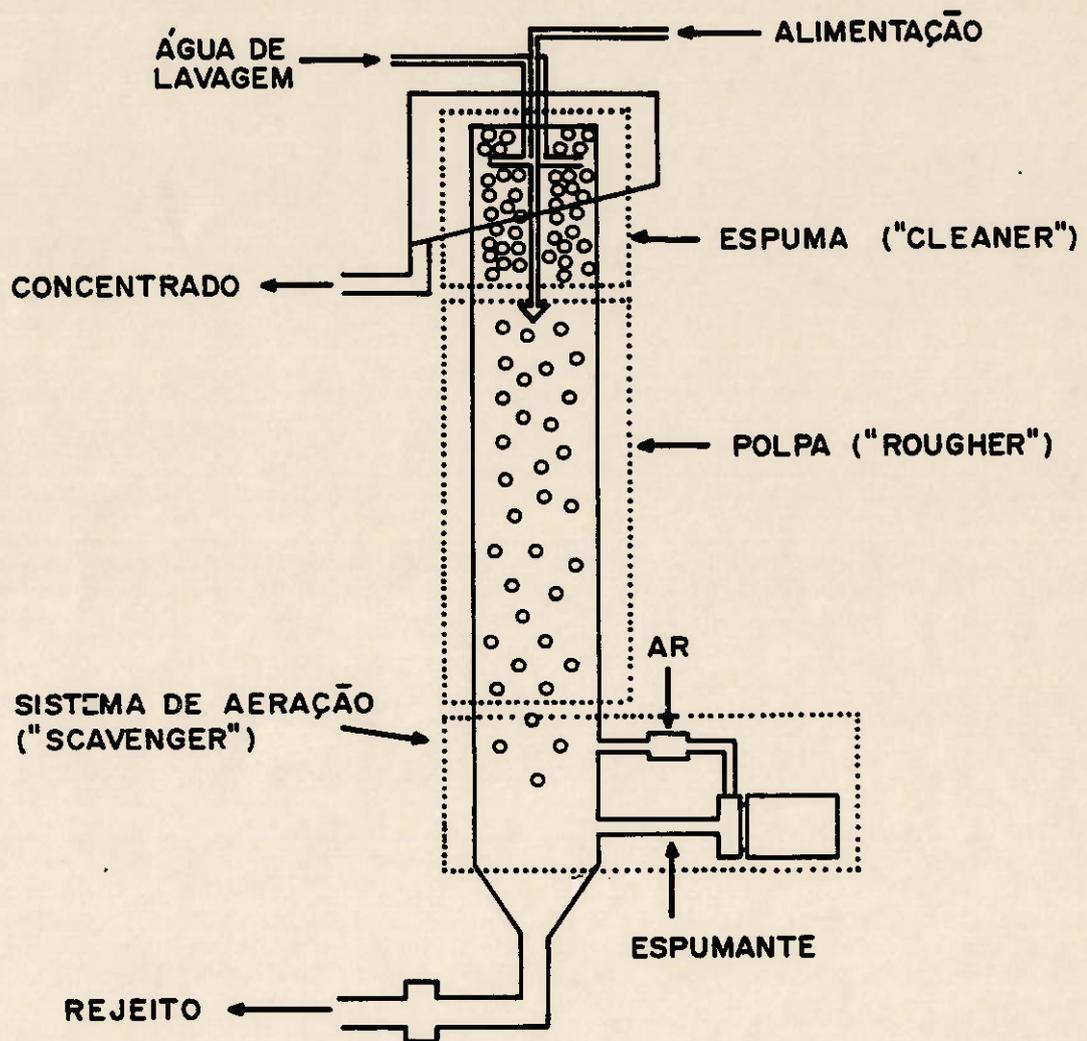


Figura 11 - Coluna Microcell

O circuito de geração de microbolhas utiliza um misturador imóvel em linha ( Figura 12 ), que é instalado no lado da pressão mais alta da bomba centrífuga (Figura 11). De modo a gerar microbolhas, uma quantidade da polpa de flotação é bombeada em uma relativamente alta velocidade através do misturador em linha. A quantidade de ar controlado e de espumante são introduzidos dentro da linha no gerador de bolhas. No interior do gerador, pequenas lâminas múltiplas são colocadas de tal forma que o fluido muda rapidamente sua direção, enquanto passa através do misturador. Isto cria cavidades no fluido e, ao mesmo tempo, quebra as bolhas grandes tornando-as bem menores, desse modo criando microbolhas. Esse gerador é capaz de produzir bolhas extremamente pequenas (0,1 a 0,6 mm) em suspensões contendo de 30 - 50% de ar em volume.

O misturador imóvel de bolhas apresenta uma série de vantagens em relação a outros sistemas existentes. A primeira e principal destas vantagens é que, diferente de muitos dos sistemas tipo aspirador que estão sendo utilizados para produzir microbolhas, a polpa pode ser bombeada diretamente através deste gerador sem causar entupimento. Em consequência, não há necessidade de adição externa de água para gerar bolhas. Isto não só reduz o consumo de água, como maximiza o tempo de residência útil da polpa dentro da coluna.

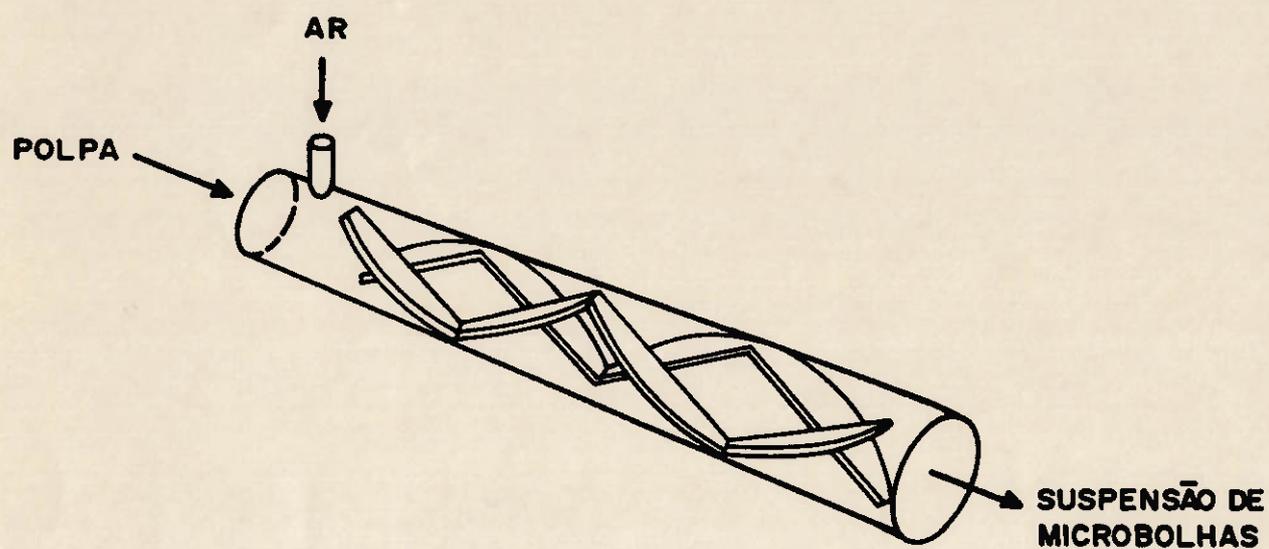


Figura 12 - Representação esquemática do gerador de microbolhas da Coluna Microcell

Uma outra vantagem oferecida por este gerador de bolhas é a ausência de partes móveis para substituição ou desgaste. Contudo, se o gerador de microbolhas apresentar desgaste, a montagem externa faz com que seja fácil a reposição do gerador sem interrupção da operação da coluna.

As operações em escala piloto com a célula Microcell são limitadas atualmente a depósitos de  $\text{CaCO}_3$ , no Canadá e E.U.A.; caulinita da Georgia (E.U.A.) e em uma planta de feldspato, na costa leste dos E.U.A. e de carvão da planta de beneficiamento de Marrowbone, na Virgínia, pertencente a Shell Mining Company.

## 7.5 - OUTROS EQUIPAMENTOS

As seções 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 apresentaram vários equipamentos cuja concepção segue os princípios fundamentais da flotação em colunas. Tais equipamentos receberam destaque especial pelo fato de constituírem aplicações mais estabelecidas e utilizadas na prática industrial. Por outro lado, a literatura corrente reporta outros equipamentos que também utilizam o conceito da coluna de flotação, mas ainda se encontram em fase de aprimoramento do seu desenvolvimento ou ainda, por algum motivo, demandam algumas modificações para solução de problemas de "design" ou operação.

A coluna Leeds <sup>(62,103)</sup> concebida por C. Dell, na Universidade de Leeds, Inglaterra, teve um certo sucesso em escala piloto e é fabricada pela empresa WEMCO GB. O sistema utiliza uma série de barras

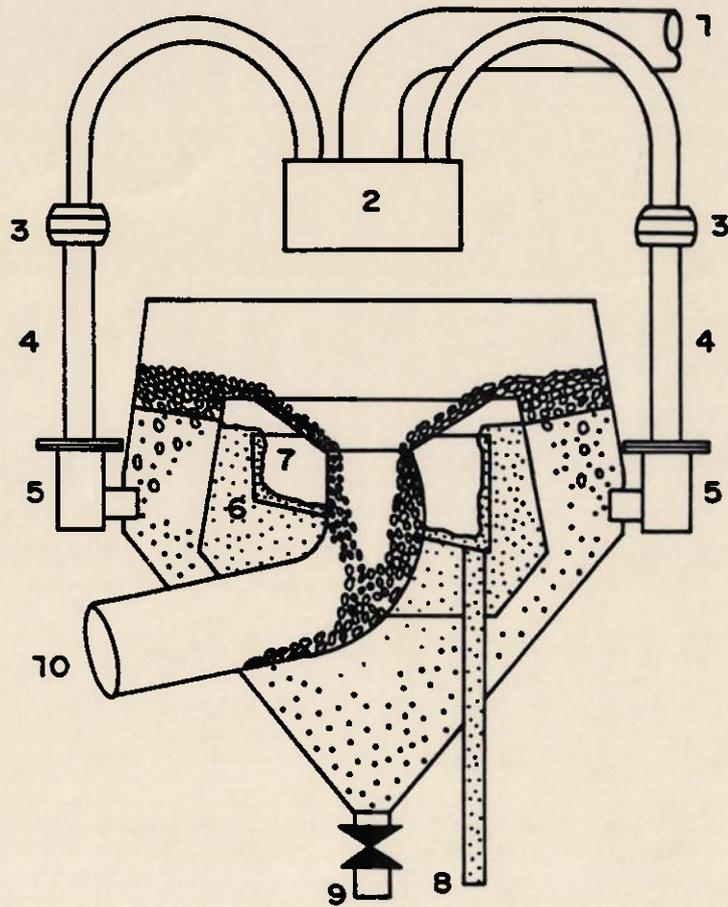
horizontais na camada de espuma para atrasar as bolhas que sobem na célula, com isso melhorando a rejeição das partículas hidrofóbicas. A coluna possui entre três e oito varas com barras, posicionadas acima do mecanismo do rotor. Estas aprisionam as bolhas temporariamente, como elas ascendem na coluna e demoram mais tempo, a ganga arrastada é drenada para fora da coluna de espuma. As varas com barreiras, uma vez que tenham acumulado ar suficiente para suprir a necessidade das imediações da parte superior da coluna, permitem que as bolha passem para o topo da célula. A coluna é muitas vezes usada em conjunto com a água de lavagem em contra-corrente, que é adicionada na interface polpa/ espuma.

Um outro sistema interessante e ainda pouco explorado é a célula EKOF <sup>(104)</sup> que se apresenta como uma variante das células de flotação pneumáticas ( Figura 13), onde as diferentes tarefas de suspensão de partículas, transporte de polpa e produção de bolhas de ar são realizadas em várias unidades conectadas em linha, cada uma das quais pode ser otimizada para desempenhar uma função específica. Uma vez condicionada com reagentes, a polpa é distribuída entre um número de aeradores vizinhos ao recipiente principal

Apesar do sistema EKOF já ter um certo impacto inicial sobre o mercado da indústria mineral, o equipamento ainda se encontra em fase de aprimoramento. Alguns testes têm sido executados no Brasil pela Fosfértil S.A. e Samarco Mineração.

Um dos exemplos de aplicação prática deste sistema foi realizado no sul da Áustria, onde a TIROLER MANESIT AG (TIMAG),

subsidiária da Rodex Austria AG, operou um sistema EKOF de cinco estágios, em sua planta de magnesita de Hochfiltzen. O sistema desenvolvido pela Erz-und Kohleflotation GmbH, da Alemanha é empregado no tratamento dos rejeitos obtidos do processo principal de flotação.



1- Alimentador  
 2- Distribuidor  
 3- Aeradores  
 4- Separadores  
 5- Caixa

6 - "Spoiler"  
 7 - Recipiente interno  
 8 - Finos de rejeito  
 9 - Grossos de rejeito  
 10 - Concentrado

Figura 13 - Célula EKOF

Outros processos que estão sendo atualmente estudados são: o sistema de hidrociclone de ar - aspergido (ASH) <sup>(69,103)</sup>, o sistema de "sprayflot" de Tecnologia de Combustíveis Avançados (AFT)<sup>(103)</sup> , a coluna de flotação "Hydrochem"<sup>(84)</sup> entre outras.

## 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES<sup>(110)</sup>

O aparecimento da flotação em coluna representou um avanço muito importante para a tecnologia mineral pois trouxe a possibilidade de se executar o processo de flotação gastando-se menos energia, utilizando-se equipamentos mais compactos, que ocupam menor área, sem partes móveis, com maior possibilidade de controle de variáveis operacionais ( permitindo mais facilmente a implantação da automação ) e ainda oferecendo a possibilidade de obtenção de concentrados mais ricos através de um número mais reduzido de etapas "cleaner". Todas estas vantagens advêm do fato de que:

i. As células de coluna, ao contrário das células mecânicas, serem capazes de realizar em regiões bastante distintas o encontro partícula/bolha na Zona de Recuperação e ao mesmo tempo permitir um considerável enriquecimento da massa flotada através da criação de uma Zona de Limpeza;

ii. Em função do objetivo de cada zona da célula ( recuperação ou limpeza ), condições hidrodinâmicas e operacionais mais favoráveis puderam ser adaptadas no sentido de maximizar o seu desempenho (taxa de aeração, distribuição de diâmetro de bolhas de ar, água de lavagem);

iii. A utilização do regime em contra-corrente tanto na Zona de Recuperação ( bolhas de ar sobem versus partículas que se sedimentam) como na Zona de Limpeza ( partículas coletadas ascendem rumo ao transbordo versus água de lavagem que desce ). Tal regime

permitiu que se eliminasse a necessidade de estágios de flotação voltados exclusivamente para a recuperação ( como o "rougher") ou exclusivamente para o enriquecimento do concentrado (etapas "cleaner");

iv. A remoção do concentrado por transbordo em regime de "plugflow" permitiu que se minimizasse o efeito de algumas variáveis no desempenho do processo, tais como Tempo de Flotação e Tempo de Residência da polpa na célula. Tais variáveis, muito importantes nas células mecânicas, perderam consideravelmente sua influência no desempenho das colunas.

Tratando-se de uma inovação que vem sendo efetivamente utilizada na prática industrial há apenas 15 anos, naturalmente seu uso constitui ainda um vasto campo para pesquisas e aprimoramentos. Um exemplo disto é o grande número de novas variantes de colunas de flotação que surgiram no mercado nos últimos 10 anos.

Todas as variantes que sucederam ao modelo pioneiro de flotação em coluna e fizeram uso de seus princípios fundamentais trouxeram consideráveis avanços para o aprimoramento do processo de flotação no que tange ao uso de equipamentos:

i. Alguns equipamentos se mantiveram mais fiéis ao "design" original como as colunas "Flotaire" e "Leeds", todavia inovaram no sentido de atrasar a velocidade ascendente das bolhas por meio de barras ( "Leeds"), ou melhoraram consideravelmente as condições de

aeração e problemas operacionais, como entupimento de linhas de ar ("Flotaire");

ii. Outros equipamentos inovaram no sentido de aprimorar o sistema de geração de bolhas e adequação do regime hidrodinâmico da operação à recuperação de partículas finas. Um exemplo típico de tal tendência foi o aparecimento das variantes "Packed Column" e "Microcell". Em ambos os casos se observou uma considerável redução do volume das células, sendo que as do tipo Microcell são capazes inclusive de realizar as etapas rougher, cleaner e scavenger em três regiões distintas de uma mesma célula;

iii. Células do tipo "Jameson" talvez tenham sido aquelas que mais modificações fizeram no modelo original de coluna de flotação, pois dispensaram os aeradores, concentraram a turbulência nos locais onde esta é requerida ( na zona de contato partícula/bolha ), introduziu controladores de nível automáticos, diminuiu o tamanho das células e reduziu os custos operacionais em 50%.

O modelo tradicional continua, todavia, muito usado e ganhando gradualmente mais espaço dentro da tecnologia mineral e fora dela, uma vez que seus princípios de operação têm até criado novas oportunidades para se aplicar o processo de flotação, como na purificação de resíduos industriais líquidos e na recuperação de partículas ultrafinas.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. BOUTIN, P.; WHEELER, D.A. Column Flotation Development Using an 18 Inch Pilot Unit. **Canadian Mining Journal**, V.88, p. 94 - 101, 1967a.
2. GUTIÉRREZ, R.L.; AGUILAR, V.O. CIMM y su Experiencia en la Tecnología de Flotación Columnar. Relatório do Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM), Santiago do Chile, Chile, 86p., 1987.
3. WHEELER, D.A. Column flotation - the original column. In: McGill University Seminar, Quebec, Canadá, p. 1-16, 1986.
4. BOUTIN, P.; WHEELER, D.A. Column Flotation. **World Mining**, 20, N<sup>o</sup> 3, p. 47 - 50, 1967b.
5. LIMA, R.M.F.; ALMEIDA, S.L.M Beneficiamento de Talco do Paraná por Flotação em Coluna. CETEM, RP 09/93, 59 p., 1993.
6. LEJA, J. **Surface Chemistry of Froth Flotation**. Editora Plenum Press, New York, 757p., 1982.
7. GLEMBOTSKII, V.A.; KLASSEN, V.I.; PLAKSIN, I.N. **Flotation**. Primary Sources, New York, 633p., 1972.
8. GAUDIN, A.M. **Flotation**. McGraw-Hill Book Company, New York, 573p., 1957.
9. Anônimo. **Canadian Mineral Journal**, V.84, p.55-56, 1963.
10. FINCH, J.; DOBBY, G. **Column Flotation**. Pergamon Press, Great Britain, 179p., 1990.
11. WHEELER, D.A. Round Table Discussion on Column Cell Flotation Practice in Canada. In: II Congresso Latinoamericano de Flotación, Concepción, Chile, 1985.
12. WHEELER, D.A. Big Flotation Column Mill Tested. **Engineering and Mining Journal**, N<sup>o</sup> 11, V.167, p. 98 -103, 1966.
13. HUGGINS, D.A.; WESELY, R.J.; JOMOTO, K. Column Flotation: Its Status and Potential for Escondida. In: 116<sup>th</sup> Annual AIME - SME Meeting, 1987.
14. GUTIÉRREZ, R.L.; AGUILAR, V.O. Tratamiento de Muestras de Alimentación a Flotación Primaria y Concentrado Primario Remolido, por Flotación en Columna Industrial. **Proy.CIMM**, Inf. Final, 1987.
15. VASSALO, J.R.; CLARK, A.E. Recovery of Phosphate Fine Particles in a Flotation Column. In: II Congresso Latinoamericano de Flotación, Concepción, Chile, p.1-16, 1985.

16. ZIPPERIAN, D.E. Characteristics of Column Flotation Utilizing Aspirated Aeration. In: SME-AIME Annual Meeting, Denver, 1984.
17. HOLLIGSWORTH, C.A. Concentration of Minerals. U.S. Patent N<sup>o</sup> 3,298,519, 1967.
18. COLLINS, D.N.; READ, R.A. Treatment of Slimes. **Minerals Science Eng.**, V.3, N<sup>o</sup> 2, p.19, 1971.
19. POLING, G.W. Selection and Sizing of Flotation Machines. In: MULAR, A.; BHAPPU, R. **Mineral Processing Plant Design**, 2nd. ed., New York, p. 887 - 905, 1980.
20. NARASIMHAN, K.S.; RAO, S.B.; CHOWDHURY, G.S. Column Flotation Improves Graphite Recovery. **Engineering and Mining Journal**, N<sup>o</sup> 4, V.173, p. 84-85, 1972.
21. BENSLEY, C.N.; ROBERTS, T.; NICOL, S.K.; Column Flotation for the Treatment of Fine Coal. In: 3<sup>rd</sup>. Australian Coal Preparation Conference, p.87-103, 1985.
22. NICOL, S.K.; ROBERTS, T.; BENSLEY, C.N.; LAMB, R. Column Flotation of Desliming Cyclone Overflow at the Riverside Coal Preparation Plant. In: 116<sup>th</sup> Annual AIME- SME Meeting, Denver, 1987.
23. ARBITER, N.; HARRIS, C.C. Flotation Machines. In: FUERSTENAU, D.W. **Froth Flotation** , Volume do 50<sup>o</sup> Aniversário, AIME, New York, p. 347 - 364, 1962.
24. HARRIS, C.C. Flotation Machines. In: FUERSTENAU, A. M. Gaudin Memorial Volume 2, AIME, New York, p. 753 - 815, 1976.
25. MATHIEU, G.I. Comparision of Flotation Column with Conventional Flotation for Concentration of Molybdenum Ore. **CIM Bulletin**, p. 41-45, 1972.
26. HU, W.; LIU, G. Design and Operating Experiences with Flotation Columns in China. In: Column Flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 6, p. 35-42, 1988.
27. ARAVENA, J.J.; CARTES, F.E. Column Flotation - Applications at Molybdenum Flotation Plant. **Int. Report**, Chuquicamata, 1986.
28. ARAVENA, J.J. Column Flotation Applications at Chuquicamata's Molybdenite Flotation Plant. In: Min. Processing and Process Control, V.2, p. 155-169, Chile, 1987.
29. FOOT, D.G.; MCKAY, J.D.; HUIATT, J.L. Column Flotation of Chromite and Fluorite Ores. **Can. Met. Quaterly**, N<sup>o</sup> 1, V. 25, p.15-21, 1986.
30. MCKAY, J.D.; FOOT, D.G.; SHIRTS, M.B. Column Flotation and Bubble Generation Studies at the U.S.B.M. In: Column Flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 18, p. 173-186, 1988.

31. DOBBY, G.S.; AMELUNXEN, R.; FINCH, J.A. Column Flotation: Some Plant Experience and Model Development, IFAC. In: International Federation for Automatic Control, IMM, p. 259 - 264, Austrália, 1985.
32. COFFIN, V.L.; MISZCZAC, J. Column Flotation at Mines Gaspé. In: 14<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress, Toronto, Canadá, Paper IV 21-1, 1982.
33. ANON The Flotation Column. **Canadian Mining Journal**, V. 84, pp. 55-56, 1963
34. ANON Flotation Column due for Mill Scale Tests. **Engineering Mining Journal**, V.166, p. 76-83, 1965.
35. CIENSKI, T.; COFFIN, V.L. Column Flotation Operation at Mines Gaspé Molybdenum Circuit. In: 13<sup>th</sup> Annual CMP Meeting, CIM, p. 240-262, Canadá, Ottawa, 1981.
36. MOON, K.S.; SIROIS, L.L. Column Flotation. In: 15<sup>th</sup> Annual CMP Meeting, CIM, paper N<sup>o</sup> 18, Canadá, 1983.
37. WHEELER, D. Column Flotation In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Canadá, 19p., 1983.
38. MAURO, F.L.; GRUNDI, M.R. The Application of Flotation Columns at Lornex Mining Corporation Ltd. In: 9<sup>th</sup> District Six Meeting, CIM, paper N<sup>o</sup> 2.3, Canadá, 1984.
39. AMELUNXEN, R.L.; PEDFERN, M.A. The Mechanics of Operation of Column Flotation Machines. In: 17<sup>th</sup> Annual CMP Meeting, CIM, p.14-31, 1985.
40. SASTRY, K.V.S.; FUERSTENAU, D.W. Theoretical Analysis of a Countercurrent Flotation Column. **Transactions SME/ AIME**, V. 247, p. 46-52, 1970.
41. FLINT, I.M.; McPHAIL, P.; DOBBY, G.S. Aerosol Frother Addition in Column Flotation. In: 25<sup>th</sup> Annual Conference of Metallurgists, CIM, paper N<sup>o</sup> 28.2, 1986.
42. RICE, R.G.; OLIVER, A.D.; NEWMAN, J.P.; WILES, R.J. Reduced Dispersion Using Baffle in Column Flotation. **Powder Technology**, V. 10, p. 201-210, 1974.
43. XU CHANGLIA Kinetic Models for Batch and Continuous Flotation in a Flotation Column. In: XV IMPC, V.3, Cannes, p. 16-26, 1985.
44. LUTTREL, G.H.; ADEL, G.T.; YOON, R.H. A Population Balance Model of Column Flotation Developed from First Principles. In: 25<sup>th</sup> Annual Conference of Metallurgists, CIM, paper N<sup>o</sup> 28.3, 1986.
45. DOBBY, G.S. A Fundamental Flotation Model and Flotation Column Scale-up. Ph.D. Thesis, Mc Gill University, 1984.

46. DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. Mixing Characteristics of Industrial Flotation Columns. **Chem. Eng. Sci.**, V.40, N° 7, p.1061-1068, Canadá, 1985.
47. DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. Flotation Column Scale-up and Modelling. **CIM Bulletin**, V. 79, N° 889, p. 89-96, 1986.
48. DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. Particle Size Dependence in Flotation Derived Model from a Fundamental Model of the Capture Process. **International Journal of Mineral Processing**, 1986.
49. DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. Particle Collection in Columns - Gas Rate and Bubble Size Effects. **Canadian Metallurgical Quarterly**, V.25, N° 1, p. 9-13, 1986.
50. DOBBY, G.S.; FINCH, J.A. A Model of Particle Sliding Time for Flotation Size Bubbles. **Journal of Colloid and Interface Sci.**, V. 109, N° 2, p. 493-498, 1986.
51. YU SHANING Particle Collection in a Flotation Column. Master Thesis, McGill University, Canadá, 1985.
52. YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R. The Cleaning Action in Column Flotation Froths. **Transactions I.M.M.**, 1987.
53. YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R. Hold-up Profiles and Bubble Size Distribution of Flotation Column Froths. **Canadian Metallurgical Quarterly**, V. 25, N° 1, p. 23-29, 1986.
54. YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R. Apparent Hindered Settling in a Gas-Liquid-Solids Countercurrent Column. **International Journal of Mineral Processing**, V.18, N° 3/4, p.155-165, 1986.
55. YIANATOS, J.B.; ESPINOZA, R.G.; FINCH, J.A.; DOBBY, G.S.; LAPLANTE, A.R. Effect of Column Height on Flotation Column Performance. In: 116<sup>th</sup> Annual AIME-SME Meeting, Denver, 1987.
56. GIRARDI, S.; FUENTES, G.; GONZÁLEZ, C. Simulación Computacional de Circuitos de Flotación Columnar. In: II Congreso Latinoamericano de Flotación, Concepción, Chile, p. 3.1-14, 1985.
57. ALVAREZ, J.; BOCAZ, J. Recuperación de Partículas Finas por Flotación en Columna. In: II Congreso Latinoamericano de Flotación, Concepción, Chile, p. 2.1-20, 1985.
58. McKAY, J.D.; FOOT, D.G.; SHIRTS, M.B. Parameters Affecting Column Flotation of Fluorite. In: 116<sup>th</sup> Annual AIME-SME Meeting, Denver, 1987.
59. LUTRELL, G.H.; ADEL, G.T.; YOON, R.H. Modelling of Column Flotation. In: 116<sup>th</sup> Annual AIME-SME Meeting, Denver, 1987.

60. FINCH, J.A.; YIANATOS, J.B.; LAPLANTE, A.R. Selectivity in Column Flotation Froths. **International Journal Mineral Processing**, 1987.
61. DELL, C.C. Column Flotation of Coal - The way to easier filtration. **Mine and Quarry**, p.36-40, 1978.
62. DEGNER, V.R., SABEY, J.B. WEMCO/ Leeds Flotation Column Development. In: Column Flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 29, p. 267-280, 1988.
63. OLIVEIRA, R.N. Desenvolvimento de um Equipamento Não - Convencional em Beneficiamento Mineral: a Célula Serrana de Flotação Pneumática. São Paulo, 1988, 122p., Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, USP.
64. BAHR, A., LUDKE, H., MEHRHOFF, F.W. The Development and Introduction of a New Coal Flotation Cell. In: 14<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress, Canadá, CIMM, paper 7-5, 1982.
65. ZIPPERIAN, D.E.; CHRISTOPHERSEN, J.A. Plant Operation of the Deister Flotaire Column Flotation Cell. In: Society of Mining Engineers of AIME, 13p., New York, 1985.
66. YANG, D.C. New Packed Column Flotation System. **Mine and Quarry**, p.257-266, 1978.
67. RAJU, G.B.; PRABHAKAR, S; KHANGAONKAR, P.R. Beneficiation of Low Grade Ores by Electro-Column Flotation Technique. **Mine and Quarry**, p. 293-298, 1978.
68. LUTTRELL, G.H.; WEBER, A.T.; ADEL, G.T. Microbubble Flotation of Fine Coal, **Mine and Quarry**, p. 205-212, 1978.
69. YE, Y. et al. Development of the Air-Sparger Hydrocyclone. **Mine and Quarry**, p. 305- 314, 1978.
70. JAMESON, G.J. New Concept in Flotation Column Design. **Mine and Quarry**, p. 281- 286, 1978.
71. KOSICK, G. A ; DOBBY, G. S.; YOUNG, P. D. ColumnEx: a Powerful and Affordable Control System for Column Flotation. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, V. 1, Canadá, p. 359-373, 1983.
72. URIBE-SALAS, A.; GOMES, C. O.; FINCH, J.A. Bias Detection in Flotation Columns. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Montreal, V.2, Canadá, 1983.
73. XU, M.; FINCH, J.A. Estimating Vessel Dispersion Number in Flotation Columns. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, V.2, Canadá, 1983.

74. HIRAYIMA, T. et al. The Application of Fuzzy Logic to Control Concentrate Grade in Column Flotation at Toyoha Mines. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Montreal, V. 2, Canadá, p. 375-389, 1983.
75. BERGH, L.G.; YIANATOS, J.B. Advances in Column Flotation Dynamics and Measurements. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Montreal, V.2, Canadá, p. 409 - 421, 1983.
76. LEE, K. Y. et al. Methodology for Selecting a Control Strategy for a Column Flotation Unit. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Montreal, V.2, Canadá, p. 423-436, 1983.
77. CLINGAN, B.V.; MCGREGOR, D. R. Column Flotation Experience at Magma Copper Company, with Related Experience of Other Mineral Processors. In: 116<sup>th</sup> Annual AIME - SME Meeting, Denver, 1987.
78. MOON, K.S.; SIROIS, L.L. Theory and Industrial Application of Column Flotation in Canadá. In: Column Flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 11, p. 91-102, 1988.
79. ZIPPERIAN, D.E.; SVENSON, U. Flotaire Column Flotation. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 7, p. 43-54, 1988.
80. GRUBER, G.A.; KELEHAN, M.E. Flotaire Cell Application in Phosphate Flotation. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 20, p.191-201, 1988.
81. PAREKH, B. K., GROppo, J.G. e STOTTS, W.F.; BLANDS, A.E. Recovery of Fine Coal from Preparation Plant Refuse Using Column Flotation. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 24, p. 227-233, 1988.
82. NICOL, S.K.; ROBERTS, T.; BENSLEY, C.N.; LAMB, R.; KIDD, G.W. Column Flotation of Ultrafine Coal: Experience at BHP - Utah Coal Limited's Riverside Mine. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 2, p. 7-11, 1988.
83. EGAN, J.R.; FAIRWEATHER, M.J.; MEEKEL, W. A. Application of Column Flotation to Lead and Zinc Beneficiation at Cominco. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 4, p. 19-26, 1988.
84. SCHNEIDER, J.C.; VAN WEERT, G. Design and Operation of the Hydrochem Flotation Column. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 31, p. 287-292, 1988.
85. MCKAY, J.D.; FOOT, D. J.; HUIATT, J.L. Column Flotation of Montana Chromite Ore. In: SME-AIME Meeting, 18p., 1985.
86. AQUINO, J.A.; LUZ, I.L.O.; COELHO, S.V.; OLIVEIRA, M.L.M.; BENEDETTO, J.S.; FERNANDES, M.D. Aplicação da Flotação em Coluna a Minérios Brasileiros. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XV Encontro

Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, p. 494 - 510, São Lourenço, Minas Gerais, 1992.

87. AQUINO, J.A.; LUZ, I.L.O.; OLIVEIRA, M.L.M.; TAKATA, L.A.; GUIMARÃES, R.C. Flotação em Coluna Aplicada a Minério Fosfático. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral/ XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, p.422-434, São Lourenço, Minas Gerais, 1992.
88. AQUINO, J.A. Estudo Comparativo de Flotação em Célula Mecânica e Coluna para o Minério de Itataia. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral/ XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, p. 435-450, São Lourenço, Minas Gerais, 1992.
89. AQUINO, J.A.; SANTANA, A.N. Flotação em Coluna Aplicada a Minério de Ferro. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral/ XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, p. 467-481, São Lourenço, Minas Gerais, 1992.
90. LIMA, R.M.F.; CAMPOS, A.R.; CORREIA, J.C.G. Dessulfuração de Carvões Nacionais por Flotação em Coluna. CETEM, RP 01/93, 101p., 1993.
91. RUBIO, J.; LOPEZ, D.A.R. Processo de Flotação de Finos de Fluorita em Coluna Modificada. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral/ XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, p.369-388, São Lourenço, Minas Gerais, 1992.
92. PERES, A.E.C.; ARAUJO, A.C. Células de Flotação: Novas Tendências e Panorama Brasileiro. Volume: Flotação: fundamentos, prática e meio ambiente. In: III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, p. 605-624, São Lourenço, Minas Gerais, 1992.
93. OLIVEIRA, M.L.M. Flotação de Carvões em Coluna: Um Caso Brasileiro. Minas Gerais, 1992, 216p., Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFMG.
94. YNCHAUSTI, R.A.; McCKAY, J. D.; FOOT JR, D. C. Column Flotation Parameters - Their Effects. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 17, p. 157-172, 1988.
95. AMELUNXEN, R.L., LLERENA, R.; DUNSTAN, P.; HULLS, B. Mechanics of Column Flotation Operation. In: Column Flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 16, p. 149-155, 1988.
96. FOOT, D.G. Improved Gas Sparger System for Column Flotation. *Tech. News, U.S. Bureau of Mines*, N<sup>o</sup> 281, 1987.
97. YIANATOS, J.B. Condiciones Típicas de Diseño y Operación de Columnas de Flotación Industrial. *Minería Chilena*, N<sup>o</sup> 74, p.39-47, 1987.

98. CASTILLO, D.I.; DOBBY, G.S. Simulations of Flotation Column Circuits. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Canadá, V. 1, p. 109-121, 1983.
99. FAIRWEATHER, M.J.; EGAN, J.R. Froth Phase Mixing by Multipoint Temperature Analysis. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Canadá, V. 1, p. 235 - 247, 1983.
100. MOYS, M.H.; ENGELBRECHT, M.J.; TERBLANCHE, N. The Design of Baffles to Reduce Axial Mixing in Flotation Columns. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Canadá, V.1 , p. 275 - 288, 1983.
101. TUCKER, J.P.; FRANZIDIS, J.P.; O'CONNOR, C.T. The Effect of Physical and Chemical Parameters on Bubble Size Distributions in a Cominco Air Sparging Test Rig. In: Seminar on Column Flotation, McGill University, Canadá, V.1, p. 289 - 302 , 1983.
102. MOGLIA, W.M. **Modelo Simplificado de Flotación Columnar**. Chile, 1987, Tesis de Grado, Universidade de Atacama.
103. SKILLEN, A. Froth Flotation - New Technologies Bubbling Under. **Industrial Minerals**, p. 47 - 59, 1993.
104. JAMESON, G.J. e MANTAPIG, E.V. Applications of The Jameson Flotation Cell In: Column'91, Sudbury, Ontário, Canadá, V.2, p. 673-687, 1991.
105. Como Opera a Célula Jameson. **Minérios/ Minerales**, Edição 176, p.22-24, 1992.
106. JACKSON, R.; HARRISON, M. Jameson Cell - A compact, highly efficient flotation machine. **Jameson Cell Marketing e MIM Technology Marketing Limited**.
107. YANG, D.C. A New Packed Column Flotation System. In: Column flotation'88, SME Annual Meeting, Arizona, Chapter 28, p. 257-266, 1988.
108. YANG, D.C. Technical Advantages of Packed Flotation Columns. In: Column'91, Sudbury, Canadá, V.2, p. 631-644, 1992.
109. LUTTRELL, G.H. ; MANKOSA, J. e YOON, R.H. In Plant Testing of Microbubble Column Flotation. **Society of Mining Engineers - Annual Meeting**, p.1-6, Colorado, 1991.
110. MURDOCK, D.J. Column Cells Continue to Find New Applications. **Mining Magazine**, p. 238-243, 1993.