

# **Estudo da Distribuição de Tamanho de Bolhas do Processo de Flotação por Ar Dissolvido Visando a Recuperação de Finos da Indústria Mineral**

**Daniel Guedes Nunes**

Bolsista de Iniciação Científica, Eng. Químico, UFRJ

**Silvia Cristina Alves França**

Orientadora, Eng. Química, D. Sc.

**Hudson Jean Bianchini Couto**

Co-orientador, Eng. Químico, D. Sc.

## **Resumo**

O objetivo desse trabalho consiste na caracterização da distribuição de tamanho de bolhas do processo de flotação por ar dissolvido (FAD), visando a otimização da sua etapa de geração de bolhas. Foi verificado o efeito da pressão de saturação do ar, do tipo e concentração de reagentes e do tipo de condicionamento químico sobre o parâmetro de otimização (tamanho de bolhas). Observou-se que o aumento da concentração de alguns aditivos (como, por exemplo, o coletor Flotigam) levou a obtenção de menores distribuições de tamanho de bolhas (analisadas no equipamento Malvern), principalmente quando esses reagentes foram adicionados previamente no tanque de saturação do ar.

## **1. Introdução**

O processo de flotação vem sendo utilizado desde o início do século XX na separação seletiva de minerais, a qual é baseada no contato entre as bolhas de ar e a fase dispersa, denominada genericamente de partículas. Como a densidade do ar é muito menor do que a densidade das partículas, as bolhas ascendem na massa líquida promovendo o contato bolha-partícula, sendo este conjunto carregado à superfície onde é recuperado.

No processo de flotação por ar dissolvido (FAD), a geração de bolhas é feita por saturação de parte do efluente com ar em tanques a pressões superiores à pressão atmosférica, seguido de uma decompressão súbita em uma válvula tipo agulha ou em dispositivos de constrições de fluxo. Neste processo, são geradas bolhas de tamanho reduzido, na faixa de 10 a 100  $\mu\text{m}$ , e a quantidade de ar disponível depende, essencialmente, da pressão de operação do sistema. Tem sido estudada e utilizada para remoção de contaminantes e recuperação de produtos em efluentes aquosos industriais, nos últimos vinte anos (França et al., 2004; Capponi et al., 2006).

Neste processo é de fundamental importância a distribuição de diâmetros das bolhas geradas, principalmente no que diz respeito às interações bolha-partícula essenciais neste processo de separação. A FAD tem a característica de gerar bolhas de ar com diâmetros bem menores que os gerados pelos processos convencionais de flotação. Este fato é de grande interesse, visto que uma menor distribuição de diâmetro de bolha conduz a uma maior eficiência de colisão bolha-partícula, melhorando a eficiência do processo de flotação.

O objetivo desse trabalho consiste na caracterização da distribuição de tamanho de bolhas do processo de FAD, visando a otimização da etapa de geração de bolhas para aplicação na recuperação de finos da indústria

mineral. Foi verificado o efeito da pressão de saturação do ar, do tipo e concentração de reagentes comumente utilizados na flotação e do tipo de condicionamento químico na distribuição de tamanho de bolhas geradas.

## 2. Materiais de Métodos

### 2.1. Materiais

Foram utilizados os seguintes reagentes: Flotigam® da Clariant e Oleato de Sódio da VETEC como coletores, Metil-Isobutil-carbinol (MIBC) como espumante e Sulfato de Alumínio da VETEC como coagulante. A água utilizada nas análises e na preparação das soluções foi previamente deionizada.

### 2.2. Geração de bolhas

As micro-bolhas foram geradas a partir de um tanque de pressurização, com capacidade de 4 L, onde foi preenchido com líquido e saturado com ar comprimido, por pelo menos 20 minutos, a uma pressão pré-estabelecida e controlada por intermédio de uma válvula reguladora (NORGREN). O líquido saturado com ar foi então liberado através de uma válvula agulha, onde sofreu descompressão súbita, provocando o surgimento das micro-bolhas de ar, as quais foram direcionadas à análise de tamanho.

### 2.3. Determinação do diâmetro médio de micro-bolhas

O diâmetro médio de micro-bolhas ( $D_b$ ) foi inicialmente estimado a partir da Equação (1), que parte da equação clássica de Stokes e leva em consideração o efeito da concentração de bolhas na porosidade de líquido ( $\varepsilon$ ), de acordo o procedimento apresentado por Couto et al. (2002).

$$D_b = \left[ \frac{18 \cdot \mu_L \cdot v}{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \varepsilon^{4,65}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde  $v$  é velocidade de ascensão da interface da frente de bolhas no meio líquido,  $\mu_L$  é a viscosidade da fase líquida (água),  $\rho_L$  e  $\rho_G$  são as densidades da fase líquida e gás (ar), respectivamente e  $g$  é a aceleração da gravidade.

As variáveis  $v$  e  $\varepsilon$  foram determinadas experimentalmente, de acordo com a estratégia utilizada por Couto et al. (2002), que consiste basicamente em medir a velocidade de ascensão da frente de bolhas em um proveta graduada e o volume final e inicial de líquido nesta mesma proveta para cálculo da  $\varepsilon$ .

É importante destacar que esse procedimento é válido apenas para estimativa de um diâmetro médio de bolhas, pois ele fica limitado à obtenção da velocidade de ascensão da frente de bolhas na parte inferior da proveta e no período inicial do ensaio, quando a interface entre a fase contínua e a frente de bolhas ainda é nítida. No decorrer do ensaio as bolhas maiores tendem a ascender mais rapidamente que as bolhas menores, dificultando a obtenção da velocidade de ascensão da frente de bolhas.

## 2.4. Determinação da distribuição de tamanhos das micro-bolhas

A distribuição de tamanho das micro-bolhas da FAD foi determinada por análise no equipamento da Malvern Instruments, modelo Mastersizer 2000SM®. Este equipamento utiliza como princípio o espalhamento de luz para a determinação da distribuição das partículas na faixa de diâmetro entre 0,1 – 2000 $\mu\text{m}$ . O procedimento de análise consiste em liberar, do tanque de saturação, o líquido saturado com ar (contendo as micro-bolhas) diretamente para o béquer do equipamento, a partir do qual a amostra   recirculada pelo sistema óptico para espalhamento da luz e posterior cáculo da distribui o de tamanhos.

As análises foram realizadas com velocidade de recircula o baixa (1000rpm), para evitar a suc o do ar atmosférico para o sistema e forma o de bolhas indesejáveis, superiores a 100 $\mu\text{m}$ . A quantidade de amostra (micro-bolhas) necessária   análise, quantificada pelo  ndice de obscura o do equipamendo (faixa usual de 10 a 20%), foi controlada pelo volume de líquido saturado utilizado. A análise foi realizada imediatamente após atingir-se o  ndice de obscura o necessário, com o objetivo de evitar problemas, de coalescência e colapso de bolhas, causados pelo cisalhamento imposto pelo equipamento, durante a recircula o dessas pelo sistema.

## 3. Resultados

### 3.1. Efeito da pressão de satura o do ar no diâmetro médio e na distribui o de tamanho de bolhas

Os valores do diâmetro médio de bolhas, obtido pela técnica fluidodinâmica, em fun o da pressão de satura o do ar ( $P_s$ ), são apresentados na Figura 1. Foram realizadas cinco medidas de diâmetro médio para obten o do erro associado ao procedimento (ilustrado pela barra de erros no gráfico), que foi considerado igual a duas vezes o valor do desvio padrão. Na Figura 2 são ilustradas as curvas de distribui o de tamanho de bolhas obtidas pela técnica de espalhamento de luz (Malvern), a partir do qual se obteve também os diâmetros médios de Sauter  $[D(3,2)]$  e o de corte de 50%  $[D(0,5)]$ , apresentados na Figura 1.

Os valores do diâmetro médio de bolhas, obtidos pelas duas técnicas, foram comparados de forma qualitativa (pois se baseiam em diferentes princípios), com o objetivo de se observar   tendência de varia o dessa propriedade com as condi es operacionais empregadas.

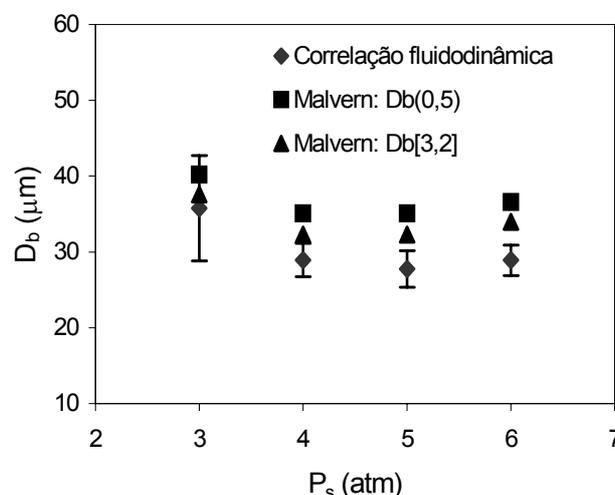


Figura 1. Diâmetro médio de bolhas obtido a partir da correla o fluidodinâmica e da análise no Malvern.

De acordo com a Figura 1, verifica-se uma diminuição do diâmetro médio de bolhas com o aumento da pressão de saturação de 3 para 4 atm, sendo pouco influenciado para pressões acima desse valor, corroborando com os trabalhos de Takahashi et al. (1979), De Rijk et al. (1994) e Burns et al.(1997), que utilizaram técnica fotográfica para obtenção do diâmetro médio de bolhas. Além disso, os diâmetros médios obtidos pelo Malvern confirmam esse resultado, apresentando a mesma tendência de variação com a pressão, apesar dos diferentes valores inerentes à técnica.

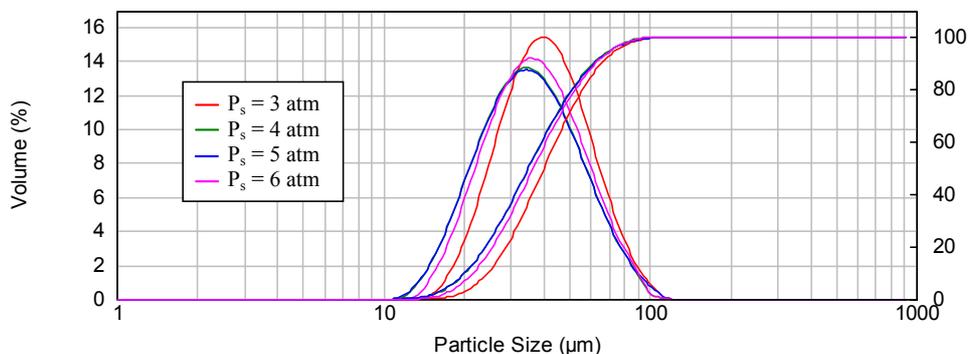


Figura 2. Curvas de distribuição de tamanho de bolhas em função da pressão de saturação do ar.

Como comentado anteriormente, a técnica fluidodinâmica é útil apenas para uma estimativa, embora simples e representativa, do diâmetro médio de bolhas. Para os demais testes foi utilizado o equipamento Malvern que fornece toda a distribuição de tamanhos, permitindo uma melhor avaliação do estudo, sendo fixada a pressão de 4 atm, a qual obteve-se menor valor de diâmetro de bolhas. Cabe ressaltar que não se conhece, na literatura, nenhum trabalho que tenha utilizado a técnica de espalhamento de luz para determinação da distribuição de tamanho de bolhas no processo de flotação. Dessa forma, o presente trabalho vem a contribuir com essa linha de pesquisa, introduzindo e mostrando a possibilidade de realização de análises rápidas e simples no equipamento Malvern para controle e caracterização de tamanho de bolhas geradas na FAD.

A influência de diferentes reagentes e em três concentrações distintas (1 ppm, 10 ppm e 100 ppm) sobre a distribuição de tamanho de bolhas foi investigada, com o objetivo de avaliar o efeito desses compostos na coalescência de bolhas. O fenômeno de coalescência ocorre quando duas ou mais bolhas ao se colidirem, unem-se formando uma bolha maior. Aqui, buscou-se investigar condições em que esse fenômeno fosse minimizado, para obtenção de menores distribuições de tamanho de bolhas, o que leva a um aumento da área superficial de contato bolha-partícula, e conseqüente melhora do processo de flotação.

Nos primeiros ensaios os aditivos foram adicionados diretamente no béquer de análise do equipamento, onde a concentração do aditivo foi ajustada com a injeção de água saturada com ar (contendo as micro-bolhas). As Figuras 3 e 4 ilustram o efeito dos coletores Flotigam e Oleato de sódio, respectivamente, na distribuição de tamanho de bolhas, nas três concentrações avaliadas.

Da análise dessas figuras, verifica-se que o aumento da concentração desses surfatantes (coletores) contribuíram para a obtenção de menores distribuições de tamanho (curvas deslocadas para a esquerda), devido à redução da coalescência de bolhas, associada à diminuição da tensão superficial do líquido.

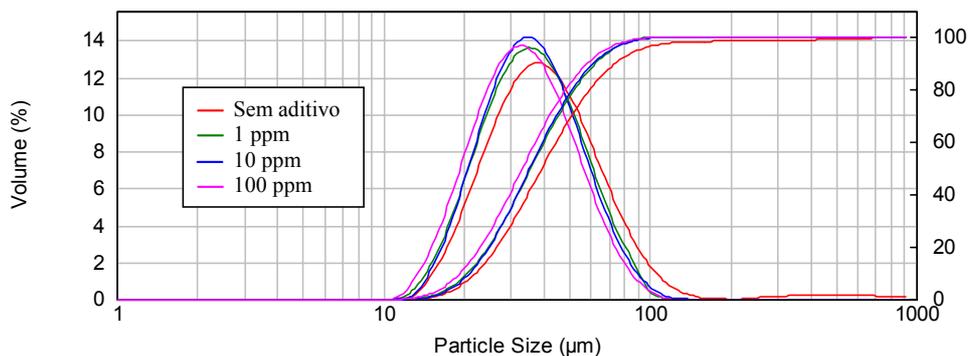


Figura 3. Distribuição de tamanho de bolhas em função da concentração de Flotigam.

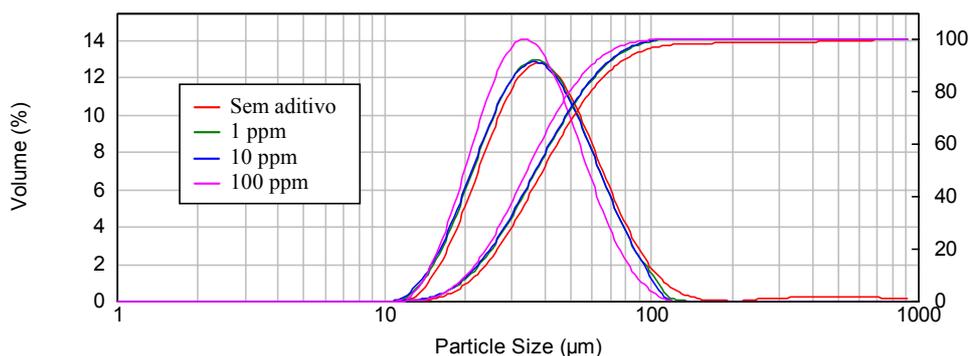


Figura 4. Distribuição de tamanho de bolhas em função da concentração de Oleato de Sódio.

Diversos autores mostraram que a presença de alguns solutos em água, mesmo em soluções diluídas, diminuem o tamanho de bolhas formadas em células convencionais de flotação (Grau & Heiskanen, 2005; Grau et al., 2005), em colunas de borbulhamento (Rodrigues & Rubio, 2003; Ribeiro & Lage, 2004) e também no processo de FAD (Ponasse et al., 1998), todos utilizando técnica fotográfica para determinação do tamanho de bolhas. Os autores atribuem esse resultado ao fato desses solutos aderir às superfícies das bolhas, causando repulsão entre essas no meio líquido, prevenindo o fenômeno de coalescência.

Os aditivos sulfato de alumínio e MIBC não influenciaram na distribuição de tamanho de bolhas, como pode ser observado nas Figuras 5 e 6, respectivamente, nas quais são ilustradas as curvas de distribuição sobrepostas.

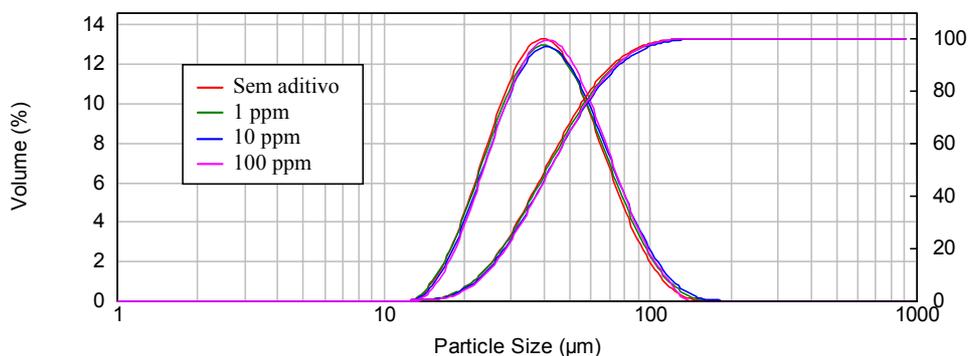


Figura 5. Distribuição de tamanho de bolhas em função da concentração de Sulfato de Alumínio.

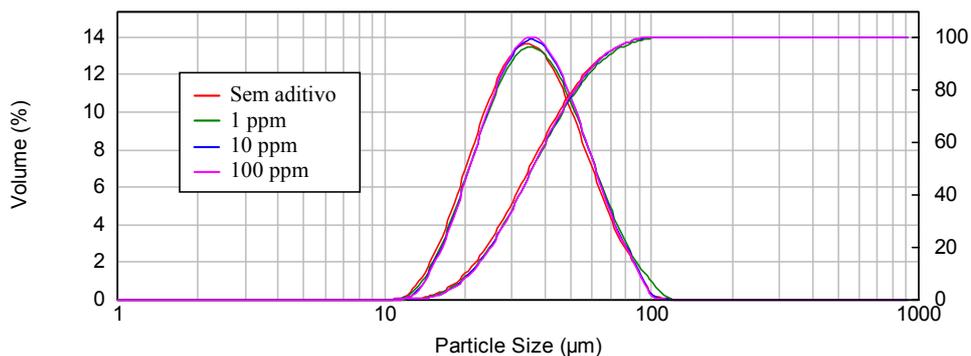


Figura 6. Distribuição de tamanho de bolhas em função da concentração de MIBC.

Com o objetivo de avaliar o condicionamento do reagente no tanque de saturação do ar, foi escolhido o coletor Flotigam, por apresentar maior influência na distribuição de tamanho de bolhas, dentre os aditivos estudados. Esse reagente foi utilizado no preparo das soluções que foram previamente condicionadas no tanque de saturação do ar. As micro-bolhas geradas, com o condicionamento realizado dessa forma, foram então analisadas no Malvern, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 7.

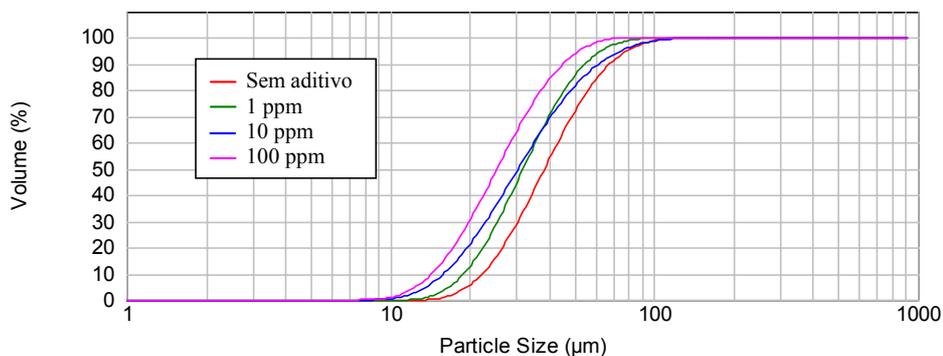


Figura 7. Distribuição de tamanho de bolhas em função da concentração de Flotigam adicionado previamente no tanque de saturação do ar.

Observa-se que houve uma significativa diminuição da distribuição do tamanho de bolhas com o aumento da concentração de Flotigam em relação à adição de reagente no béquer do equipamento, após a etapa de geração das micro-bolhas. Nesse caso, o condicionamento do reagente realizado no tanque de saturação previne o fenômeno de coalescência de bolhas logo na sua geração, que ocorre na saída de válvula agulha após o tanque. Na outra situação, as bolhas são geradas em água e depois direcionadas para o béquer onde são condicionadas, evidenciando que nesse percurso (da saída da válvula agulha ao béquer, onde é realizada a análise), existe ainda uma certa coalescência de bolhas.

#### 4. Conclusões

A utilização de pressões de saturação do ar a partir de 4 atm, levou à menores distribuições de tamanho de bolhas, sendo fixado esse valor para avaliar o efeito de reagentes. Os coletores Flotigam e oleato de sódio também influenciaram na distribuição de tamanho de bolhas, contribuindo para um menor valor desse parâmetro com o aumento de suas concentrações. O condicionamento do reagente realizado no tanque de saturação levou

a uma diminuição mais significativa da distribuição de bolhas, mesmo quando apenas 1 ppm do reagente foi utilizado. Esse trabalho introduziu e mostrou a possibilidade de realização de análises rápidas e simples, de espalhamento de luz (utilizando o equipamento Malvern), para controle e caracterização de tamanho de bolhas geradas no processo de FAD.

## 5. Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica - IC. Aos colegas do Setor de Caracterização Tecnológica - SCT/COAM pela viabilização do equipamento Malvern, utilizado nas análises de distribuição de tamanho de bolhas.

## 6. Referências Bibliográficas

- BURNS, S. E.; YAICOUMI, S.; TSOURIS C. Microbubble Generation for Environmental and Industrial Separations. **Separation and Purification Technology**, v.11, p.221-232, 1997.
- CAPPONI, F.; SARTORI, M.; SOUZA, M.L.; RUBIO, J. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxide colloidal precipitates, **International Journal of Mineral Processing**, v.79, n.3, p.141–208, 2006.
- COUTO, H. J. B.; MELO, M.V.; MASSARANI, G. Tratamento de Efluentes da Indústria Láctea Através da Flotação por Ar Dissolvido, In: XXX ENEMP – Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2002, São Carlos-SP, **Anais do XXX ENEMP – Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados** (impresso), Outubro, 9p.
- DE RIJK S. E.; VAN DER GRAAF, J. H. J. M.; DEN BLANKEN, J. G. Bubble Size in Flotation Thickening. **Water Research**, v.28, n.2, p.465-473, 1994.
- GRAU, R. A.; HEISKANEN, K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells. **Minerals Engineering**, v.18, p.1164–1172, 2005.
- FRANÇA, S. C. A.; ANDRADE, M. C.; LUZ, A. B. Flotação por ar dissolvido na recuperação de água de processo, **Anais do XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME**, 2004, p.103-110, Florianópolis-SC, v. 2, junho.
- GRAU, R. A.; LASKOWSKIB, J. S.; HEISKANEN, K. Effect of frothers on bubble size. **International Journal of Mineral Processing**, v.76, p. 225– 233, 2005.
- PONASSE, M.; DUPRE, V.; AURELLE, Y.; SECQ, A. Bubble formation by water release in nozzle-II. Influence of various parameters on bubble size. **Water Resources**, v.32, n.8, p.2498-2506, 1997.
- RIBEIRO, C. P.; LAGE, P. L. C. Experimental study on bubble size distributions in a direct-contact evaporator. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.21, n.01, p.69-81, 2004.
- RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, v.82, p.1-13, 2007.
- TAKAHASHI T.; MIYAHARA T.; MOCHIZUDI H. Fundamental Study of Bubble Formation in Dissolved Air Pressure Flotation. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v.12, p.275-280, 1979.