

Estudo de distribuição de tamanho de bolhas em células de flotação

Study of bubbles size distribution in flotation cells

Renata Nigri de Almeida

Bolsista PCI, Eng. Química, UFRJ

Hudson Jean Bianchini Couto

Supervisor, Eng. Químico, D. Sc.

Resumo

O tamanho médio e a distribuição de tamanho de bolhas - DTB são variáveis importantes no processo de flotação, influenciando diretamente na eficiência de coleta e no transporte das partículas. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo medir e avaliar o tamanho médio e a DTB geradas em uma coluna de flotação em função de algumas variáveis mais importantes do processo de flotação como velocidade superficial do ar e dosagem do espumante Flotanol D14. O equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) foi utilizado para captura e visualização das bolhas, e, posteriormente, foram utilizados o *software* da APBS e o *software* livre *ImageJ* para o processamento das imagens capturadas, com o intuito de avaliar qual melhor se aplica para o processamento e análise de imagens nas condições desse trabalho. Além das medidas do tamanho de bolhas, também foi possível obter medidas de *holdup* de gás (\mathcal{E}_g) e do fluxo superficial de área de bolhas (S_b). A concentração crítica de coalescência obtida para o Flotanol D14 foi de 7 mg/L e os resultados obtidos de \mathcal{E}_g e S_b apontaram para uma boa concordância com os valores encontrados na literatura. O *software* *ImageJ* foi considerado mais confiável para o processamento de imagem e análise do tamanho de bolha, devido à possibilidade de controle das etapas de processamento pelo usuário.

Palavras chave: flotação, tamanho de bolha, análise de imagens.

Abstract

The average size and the bubble size distribution - BSD are important variables in the flotation process, as they influence the efficiency on collecting and transporting the particles. Therefore, the present work has as objective to measure and evaluate the average size and BSD generated in a flotation column as a function of some important variables of the flotation process as superficial air velocity and Flotanol D14 frother concentration. The Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS) equipment was used to capture and visualize the bubbles, and later, APBS software and free software ImageJ were used to process the captured images, in order to evaluate which is best applied to the processing and analysis of images in the conditions of this work. In addition to bubble size measurements, it was possible to perform measurements of gas holdup (\mathcal{E}_g) and bubble surface area flux (S_b). The critical coalescence concentration obtained for Flotanol D14 was 7 mg/L and the results obtained from \mathcal{E}_g and S_b showed a good agreement with the values found in the literature. The most reliable ImageJ was considered for image processing and bubble size analysis due to the possibility of control of the processing steps.

Key words: flotation, bubble size, image analysis.

1. Introdução

O tamanho de bolha e a distribuição de tamanho de bolhas (DTB) são parâmetros importantes no processo de flotação devido a seu efeito na eficiência de coleta e de transporte das partículas, exigindo uma variação extensa da DTB para diversos tamanhos de partícula. Nas colunas de flotação, o tamanho médio de bolhas está situado na faixa de 0,5 a 2,0 mm (AQUINO *et al.*, 2004).

Quanto menor o tamanho das bolhas geradas, maior é a área interfacial de contato bolha-partícula e maior é a eficiência do processo. Entretanto, bolhas de tamanhos muito reduzidos apresentam uma velocidade de ascensão baixa, podendo ser inferior à velocidade descendente da polpa, acarretando, em consequência, perdas de partículas hidrofóbicas coletadas no fluxo de material não flotado. Nesse contexto, existe um tamanho médio ideal de bolhas, que poderá ser ajustado por meio de variáveis operacionais (vazão de ar, por exemplo) ou por meio da adição de soluções de tensoativos (AQUINO *et al.*, 2004).

Diversos autores reportam a importância para determinar e controlar o tamanho de bolhas (AQUINO *et al.*, 2004; FINCH e DOBBY, 1990; GRAU *et al.*, 2005; RODRIGUES e RUBIO, 2003). Entre os métodos para medida do tamanho de bolha destaca-se o método baseado na captura e análise de imagens digitais utilizando visores externos mostrando-se uma solução promissora para medição do tamanho de bolhas em células de flotação industriais.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo medir e avaliar o tamanho médio e a distribuição do tamanho de bolhas (DTB) geradas na coluna de flotação de 3" (7,6 cm) de diâmetro interno do CETEM, em função de algumas variáveis importantes do processo de flotação, como velocidade superficial do ar e dosagem de espumante.

3. Material e Métodos

Os ensaios deste trabalho foram realizados no CETEM, em uma coluna de 7,6 cm de diâmetro. Compreenderam a avaliação da dosagem do espumante (C_f) e da velocidade superficial do ar (J_g) sobre os parâmetros como tamanho médio de bolha (diâmetro médio de Sauter, $D_{3,2}$), fluxo superficial de bolha (S_b) e *holdup* de ar (\mathcal{E}_g).

3.1. Reagentes

Para os estudos de determinação do tamanho de bolhas e de *holdup* de ar foi utilizado o espumante Flotanol D14, um polipropileno glicol metileter, fornecido pela Clariant. Foram utilizadas dosagens deste reagente nas concentrações de 2,5, 5, 10, 20 e 50 mg/L.

3.2. Coluna de Flotação

Os ensaios foram realizados em uma coluna de flotação de bancada, com 7,6 cm de diâmetro interno e 159 cm de altura, construída em PVC transparente e volume total de 7,2 L, fabricada pela Eriez Minerals Flotation Group (Canadá). O aparato é constituído também por um sistema de controle de nível da vazão de água de lavagem e de ar, e bombas peristálticas para alimentação e retirada de produtos. O fluxo de bolhas de ar foi produzido por um aerador tipo tubo poroso, instalado na parte inferior da coluna.

3.3. Procedimento para visualização e captura das bolhas

Para visualização e captura de bolhas foi utilizado o equipamento Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS), comercializado pela Stone Three (África do Sul). Esse dispõe de um reservatório de acrílico graduado localizado no topo, um compartimento para instalação da câmera fotográfica e uma fonte de luz. As bolhas geradas na coluna de flotação ascendem por um tubo (tubo amostrador) de acrílico inserido na coluna com 2 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento posicionado no centro e com um ângulo de 45° em relação à coluna e um tubo na vertical com 2,5 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento levando as bolhas até a câmara de visualização.

A fonte de luz LED é utilizada para garantir o contraste da imagem. A câmara de visualização é posicionada com uma inclinação de 15%, para permitir o espalhamento das bolhas em uma única camada e minimizar a sobreposição de bolhas, fornecendo um plano inequívoco de foco. As imagens das bolhas foram fotografadas com uma câmera digital Canon modelo PowerShot S95, armazenadas e processadas. A Figura 1 (a) mostra o desenho esquemático do sistema montado para os ensaios de determinação do tamanho de bolha e a Figura 1 (b), a foto da coluna de flotação acoplada ao APBS utilizada nos ensaios.

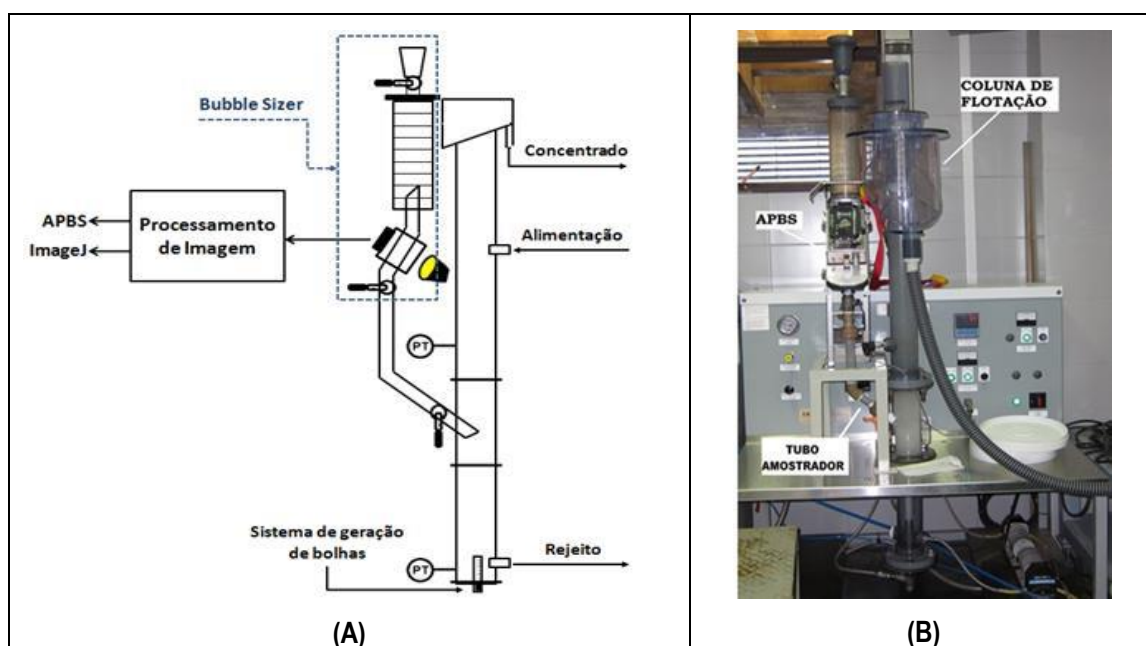


Figura 1. Desenho esquemático do sistema montado (a) e foto da coluna de flotação acoplada ao APBS (b) para os estudos de determinação do tamanho de bolha.

3.4. Processamento e análise das imagens

O processamento das imagens adquiridas foi realizado por dois diferentes *softwares*, Bubble Sizer (APBS) e *ImageJ*, com o intuito de comparar e estabelecer a melhor técnica para determinação do tamanho de bolhas. O Bubble Sizer é um *software* do equipamento APBS, onde o algoritmo que utiliza para o processamento das imagens é desconhecido. O *ImageJ* é um programa livre que pode ser obtido gratuitamente no site <https://imagej.nih.gov/ij/>, onde sua principal vantagem é a possibilidade de visualizar em tempo real o resultado de diferentes técnicas de tratamento de imagens, através de uma interface gráfica. As seguintes etapas foram utilizadas no processamento das imagens: 8-bit (conversão para tons de cinza); limiarização (*threshold*); *fill holes* (preenchimento das bolhas demarcadas); *watershed* (segmentação); identificação e análise das imagens.

Na análise das imagens foi adotado como diâmetro médio o diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$), definido como o diâmetro médio volume-superfície, conforme apresentado pela Equação 1, onde d_b e n são o diâmetro de bolha e o número de bolhas para classe de tamanho “i”, respectivamente.

A partir do diâmetro das bolhas calculado, foi possível estimar o fluxo superficial de área de bolha (S_b), através da Equação 2, indicando que diâmetros de bolhas menores favorecem um aumento no fluxo de área de bolhas para a coleta de partículas dispersas na polpa de minério. Onde J_g é a velocidade superficial do gás (cm/s).

Também foram realizadas medidas de *holdup* de ar (ϵ_g), definida como fração volumétrica de ar contida em uma determinada região da coluna, determinadas através de dois transmissores de pressão instalados na lateral coluna, pela diferença de pressão entre esses dois pontos. O *holdup* foi calculado pela Equação 3, onde ΔP se refere à diferença de pressão (Pa), ρ_{sl} é a densidade da polpa (kg/m^3), L é a distância entre os transmissores de pressão (m) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

$$D_{3,2} = \frac{\sum n_i \cdot d_{bi}^3}{\sum n_i \cdot d_{bi}^2} \quad (1) \quad S_b = 6 \cdot \frac{J_g}{D_{3,2}} \quad (2) \quad \epsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} \cdot g \cdot L} \quad (3)$$

4. Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra a distribuição do tamanho das bolhas para diferentes concentrações de Flotanol D14 para uma velocidade superficial constante em 0,5 cm/s. Para fins de comparação, são apresentados os resultados dos dois *softwares* utilizados para o processamento das imagens. Os resultados mostram que conforme a concentração do espumante aumenta, o diâmetro das bolhas diminui e, conseqüentemente, aumenta o número de bolhas, devido à redução do efeito de coalescência, até atingir a estabilização, corroborando com vários trabalhos da literatura (GRAU *et al.*, 2005; GUPTA *et al.*, 2007; COUTO *et al.*, 2009).

Segundo alguns autores (GRAU *et al.*, 2005; GUPTA *et al.*, 2007), a concentração crítica de coalescência (CCC) de um espumante corresponde a menor concentração que proporciona o menor diâmetro de bolha, sendo um importante parâmetro para comparar o desempenho de diferentes espumantes de flotação. De acordo com a Figura 2, observa-se que a partir de concentrações superiores 7 mg/L praticamente não houve mudança nos valores do diâmetro médio de Sauter, indicando esta como a CCC deste espumante para as condições operacionais estabelecidas. A partir desta concentração o diâmetro médio ficou estabilizado em, aproximadamente, 0,78 mm (APBS) e 0,99 mm (*ImageJ*).

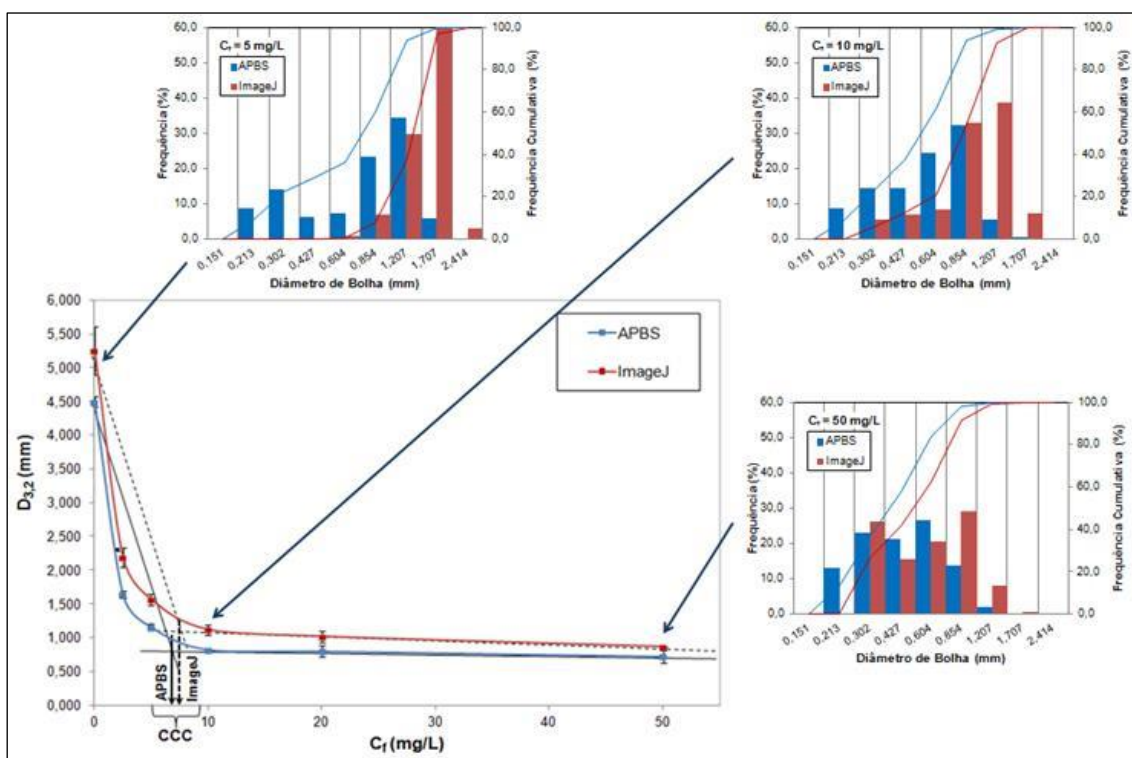


Figura 2. Efeito da concentração do espumante sobre a distribuição do tamanho de bolhas.

$J_g = 0,5 \text{ cm/s}$; $C_f = 5, 10 \text{ e } 50 \text{ mg/L}$.

A Figura 3 apresenta os resultados de medidas de *holdup* de gás (\mathcal{E}_g) em função da velocidade superficial do ar (J_g), para a concentração de Flotanol D14 variando entre 2,5 e 50 mg/L. Observa-se um aumento praticamente linear do \mathcal{E}_g com o aumento da J_g , em função do aumento do número de bolhas para maiores vazões de ar, o que é intensificado com o aumento da concentração de espumante, conforme reportado por Finch e Dobby (1990). Verifica-se que para um valor constante de J_g , há um aumento de *holdup* com o aumento da concentração do Flotanol D14, mesmo depois da CCC ($C_f > 7 \text{ mg/L}$), podendo ser explicado pelo aumento do número de bolhas, principalmente de bolhas mais finas (KUAN, 2009), conforme visualizado na Figura 2, onde verifica-se um aumento de bolhas entre 0,2 a 0,4 mm com o aumento da concentração do Flotanol D14.

A Figura 4 mostra a relação entre o fluxo superficial de área de bolha (S_b) e a velocidade superficial de ar (J_g) de forma comparativa entre os dados obtidos pelo *software* APBS e *ImageJ*. Observa-se uma relação linear entre S_b e J_g para uma mesma concentração de Flotanol D14. Também nota-se que para uma velocidade superficial constante, com a adição do espumante ocorre um aumento no fluxo superficial de área, já que o espumante reduz o diâmetro de bolhas (TAVERA *et al.*, 2001). O S_b variou entre 15 e 80 $\text{cm}^2/\text{cm}^2.\text{s}$ (APBS) e 10 e 65 $\text{cm}^2/\text{cm}^2.\text{s}$ (*ImageJ*), valores coerentes ao reportados na literatura.

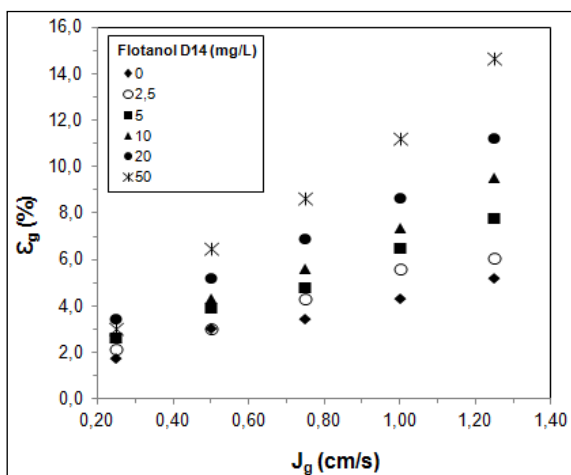


Figura 3. Curvas de *holdup* (ϵ_g) em função da velocidade superficial do ar (J_g). $C_f=2,5-50$ mg/L.

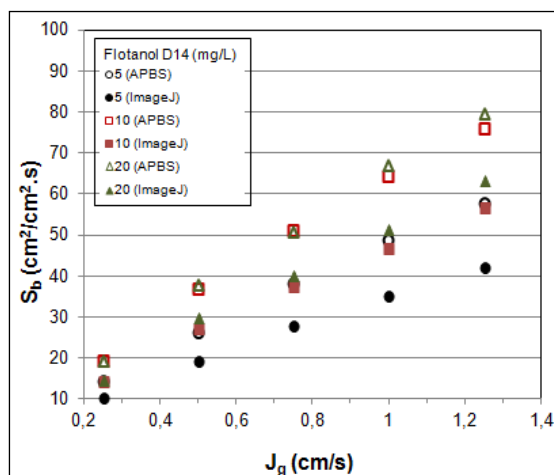


Figura 4. Curvas de *holdup* de gás (ϵ_g) em função da velocidade superficial do ar (J_g). $C_f=5-20$ mg/L.

5. Conclusão

Com o aumento da concentração do Flotanol D14, foi verificada uma diminuição mais acentuada no diâmetro médio de bolha até cerca de 7 mg/L, a partir da qual a redução no diâmetro médio de bolha foi muito menos significativa, sugerindo essa como sendo a concentração crítica de coalescência (CCC). As medidas de *holdup* mostraram que ocorreu um aumento desse parâmetro com o aumento da velocidade superficial do gás e da concentração do Flotanol D14. O fluxo superficial de bolhas (S_b) variou entre 15 e 80 $\text{cm}^2/\text{cm}^2.\text{s}$ (APBS) e 10 e 65 $\text{cm}^2/\text{cm}^2.\text{s}$ (*ImageJ*), e foi verificada uma relação linear entre esse parâmetro e a velocidade superficial do gás.

Os dois *softwares* utilizados para calcular o diâmetro médio de Sauter apresentaram resultados similares, sendo que o *ImageJ* sempre apresentou valores um pouco mais elevados do $D_{3,2}$ comparado com o APBS. Analisando as imagens obtidas no processamento feito pelo *software* do APBS, gerou dúvidas se todas as bolhas detectadas eram realmente bolhas, principalmente algumas muito pequenas que foram detectadas, uma vez que o processamento deste *software* é do tipo "caixa-preta". Não obstante, notou-se que parte das bolhas de pequeno diâmetro capturadas são provenientes da adesão e acúmulo destas bolhas na câmara de visualização. No *ImageJ*, como se tem domínio sobre o processamento de imagem, pode-se descartar essas bolhas duvidosas por meio de um filtro de tamanho, sendo este mais confiável para o processamento de imagem para este trabalho específico.

6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida e ao CETEM pela infraestrutura.

7. Referências Bibliográficas

- AQUINO, J. A., OLIVEIRA, M. L. M., FERNANDES, M. D., Flotação em coluna. In: **Tratamento de Minérios** (Luz, A.B., Sampaio, J.A., Almeida, S.L.M., Editores), CETEM/MCT, 4.ed., Rio de Janeiro, 2004.
- COUTO, H. J. B., NUNES, D. G., NEUMANN, R., FRANÇA, S. C. A. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. **Minerals Engineering**, 22, p. 330-335, 2009.
- FINCH, J. A., DOBBY, G. S. **Column Flotation**. Pergamon Press, Great Britain, 1a. ed., 1990.
- GRAU, R. A., LASKOWSKI, J. S., HEISKANEN, K. Effect of frothers on bubble size. **International Journal of Mineral Processing**, 76, p. 225-233, 2005.
- GUPTA, A. K., BANERJEE, P. K., MISHRA, A., SATISH, P., PRADIP. Effect of alcohol and polyglycol ether frothers on foam stability, bubble size and coal flotation. **International Journal of Mineral Processing**, 82, p. 126-137, 2007.
- KUAN, S.H. **The effect of solids on gas holdup, bubble size and water overflow rate in flotation**. Dissertação (Mestrado). McGill University, Montreal, Canada, 2009.
- RODRIGUES, R. T., RUBIO, J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. **Minerals Engineering**, 2003, 16, p. 757-765, 2003.
- TAVERA, F. J., ESCUDERO R., FINCH, J. A. Gas holdup in flotation columns: laboratory measurements. **International Journal of Mineral Processing**, 61, p. 23-40, 2001.