

# Estudo de Fluidodinâmica em Colunas de Flotação

## Study of the Fluid Dynamics in Flotation Columns

**Renata Nigri de Almeida**

Bolsista Capacitação Institucional, Engenheira Química, UFRJ

**Hudson Jean Bianchini Couto**

Supervisor, Engenheiro Químico, D. Sc.

### Resumo

Este trabalho apresenta estudos realizados em uma coluna de flotação em escala de bancada acoplada ao *Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS)*, equipamento utilizado para captura e visualização de bolhas, com o intuito de medir a distribuição de tamanho de bolhas geradas e avaliar o melhor *software* de processamento e análise de imagens digitais. Foram utilizados dois *softwares* para o processamento das imagens: o *Bubble Sizer* e o *ImageJ*. O espumante utilizado foi o Flotanol D14, nas concentrações de 5, 10, 20, 50 e 100 mg/L. Verificou-se que a variação da concentração do espumante influenciou, fortemente, no diâmetro médio de bolha até a concentração crítica de coalescência (CCC), atingida com 10 mg/L do espumante. Para concentrações de espumante acima da CCC, o diâmetro médio de bolha foi de aproximadamente 0,8 mm. Comparando os dois *softwares* utilizados para o processamento de imagens, verificou-se que os valores do diâmetro médio de Sauter foram próximos, concluindo que o *software* do APBS é adequado para o processamento das imagens.

Palavras chave: tamanho de bolhas; flotação; espumante; análise de imagens, diâmetro médio de Sauter.

### Abstract

This paper presents studies on a flotation column operated in a counter coupled to Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS), equipment used to capture and display of bubbles, in order to note the generated bubble size distribution and to evaluate the best processing software and analyzing digital images. Two softwares were used for image processing: Bubble Sizer and ImageJ. The frother used was Flotanol D14, at concentrations of 5, 10, 20, 50 and 100 mg/L. It was found that the variation of frother concentration strongly influenced the average bubble diameter until it reach the critical coalescence concentration (CCC), achieved with 10 mg/L of frother. At frother concentrations above CCC, the average bubble diameter was approximately 0,8 mm. Comparing the two softwares used for processing images, it was found that the value of Sauter mean diameter were very similar, concluding that the software APBS is sufficient for image processing.

Key words: bubble size; flotation; frother; image analysis; Sauter mean diameter.

## 1. Introdução

Os espumantes são compostos orgânicos heteropolares que contêm um grupo polar (OH, COOH, CO, OSO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>OH) em uma das extremidades e um radical hidrocarbônico, capaz de atuar na interface líquido/gás diminuindo a tensão superficial dessa interface, de modo a proporcionar uma maior estabilidade e melhor dispersão nas bolhas de gás. O uso de espumantes em processos de flotação está relacionado com a necessidade de se reduzir a tensão superficial, evitar a coalescência das bolhas e facilitar a adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas de ar (Chaves *et al.*, 2010).

Diversos autores têm estudado o efeito dos espumantes sobre o tamanho de bolhas (Cho e Laskowski, 2002; Melo e Laskowski, 2006; Grau *et al.*, 2005; Gupta *et al.*, 2007), já que este efeito resulta na capacidade de evitar a coalescência de bolhas. Com o aumento da concentração do espumante o tamanho de bolha diminui gradativamente, diminuindo o efeito de coalescência, até uma determinada concentração, denominada concentração crítica de coalescência (CCC), onde a coalescência de bolhas é completamente prevenida e a partir da qual o diâmetro médio de bolhas se torna constante. (Grau *et al.*, 2005)

Entre os métodos empregados para determinação do tamanho de bolhas, o mais comum é o fotográfico com processamento e análise de imagens digitais.

## 2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da concentração do espumante no diâmetro médio das bolhas e sugerir um método para análise de imagens de tamanho de bolhas geradas a partir de uma coluna de flotação.

## 3. Material e Métodos

### 3.1 Reagentes

O espumante empregado foi o Flotanol D14, um polipropileno glicol metileter fornecido pela Clariant. Foram utilizadas dosagens deste reagente nas concentrações de 5, 10, 20, 50 e 100 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 (Figura 1), 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.

As condições operacionais dos ensaios estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições operacionais dos ensaios para determinação do tamanho de bolha na coluna de flotação.

Parâmetros	Condições
Vazão de alimentação da coluna	0,28 L/min
Velocidade superficial de alimentação ( $J_f$ )	0,10 cm/s
Vazão de ar	1,36 L/min
Velocidade superficial do ar ( $J_g$ )	0,50 cm/s
Dosagens de espumante (Flotanol D14)	5 a 100 mg/L
Altura da camada espuma	20 cm

### 3.3 Procedimento para medição do tamanho de bolha

Para visualização e captura de bolhas foi utilizado o equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS)*, comercializado pela *Stone Three* (África do Sul) (Figura 1). Esse dispõe de um reservatório de acrílico graduado localizado no topo, um compartimento para instalação da câmera fotográfica e uma fonte de luz.



Figura 1. Coluna de flotação acoplada ao APBS.

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 qual possui uma janela de vidro. 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. O processamento das imagens adquiridas foi realizado por dois diferentes softwares, *Bubble Sizer* 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. Fornece informações como, por exemplo, número de bolhas, diâmetros máximo, mínimo, médio de Sauter das bolhas e variância (Figura 2). Já 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. Possui várias ferramentas para melhor definição e calibração de imagens, como: ajuste de brilho e contraste, segmentação e análise, entre outros. A Figura 3 apresenta as principais etapas realizadas no processamento das imagens pelo *ImageJ*.

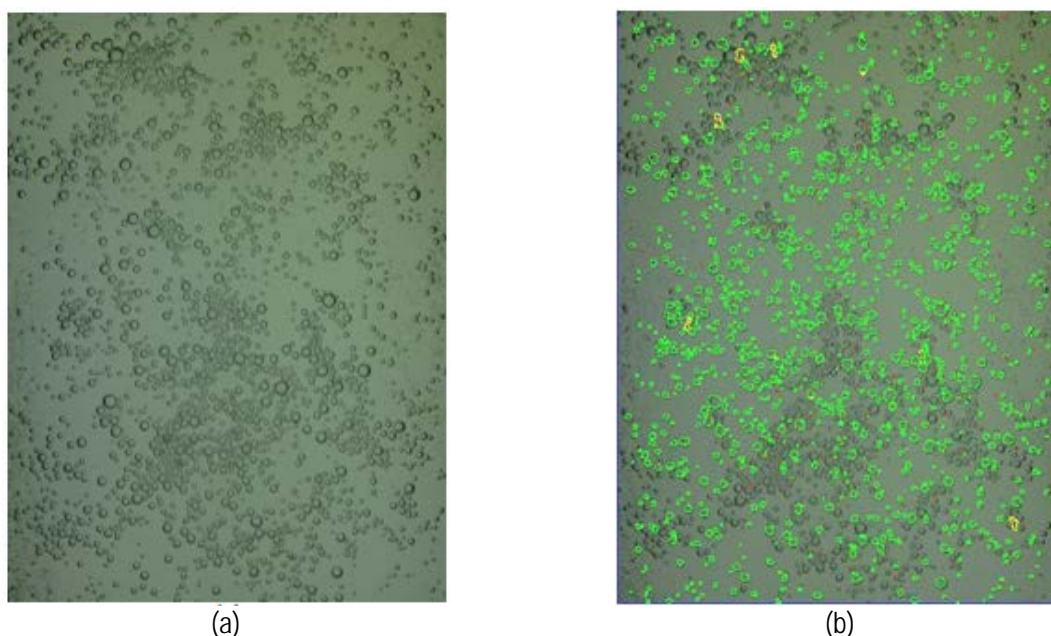
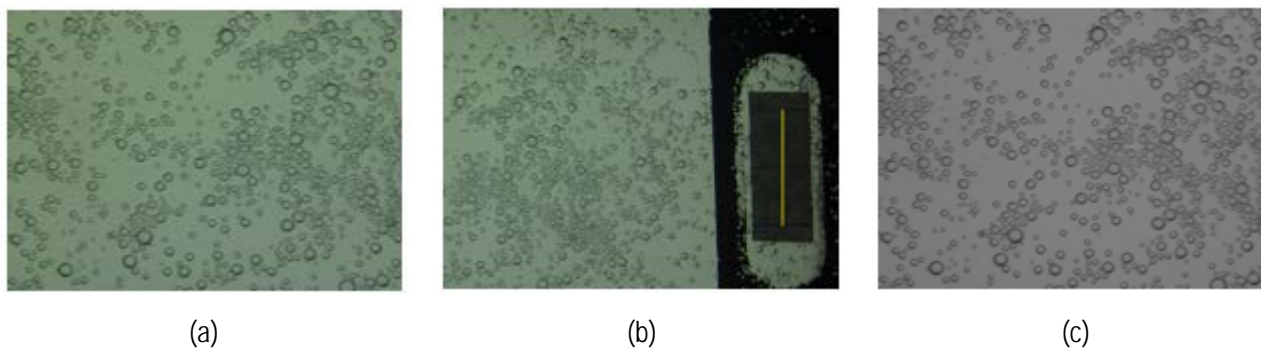


Figura 2. (a) Imagem capturada pelo APBS. (b) Tratamento da imagem pelo software *Bubble Sizer*.



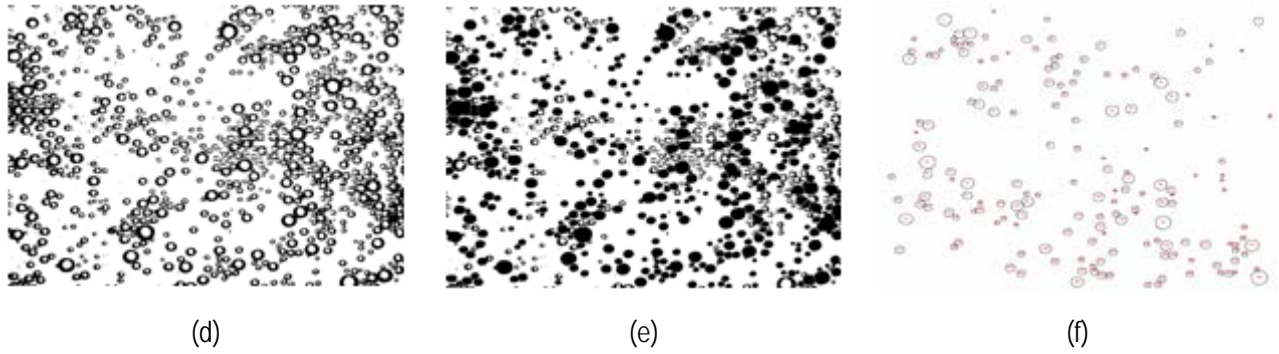


Figura 3. Principais etapas de processamento realizadas pelo *ImageJ*. (a) imagem original; (b) *set scale* (configuração da escala); (c) 8-bit (conversão para tons de cinza); (d) *threshold* (limiarização); (e) *fill holes* (preenchimento dos espaços internos) + *watershed* (segmentação); (f) identificação e análise das imagens.

Na análise das imagens foi adotado como diâmetro médio o diâmetro médio de Sauter ( $D_{32}$ ), definido como o diâmetro médio volume-superfície, conforme apresentado pela Equação 1.

$$d_{\text{sauter}} = \frac{\sum n_i d_{bi}^3}{\sum n_i d_{bi}^2} \quad (1)$$

Onde  $d_b$  e  $n$  são o diâmetro de bolha e o número de bolhas para classe de tamanho "i", respectivamente.

#### 4. Resultados e Discussão

Na Figura 4 são apresentados os resultados da CCC, comparando os *softwares* utilizados para o processamento das imagens e avaliando a influência do espumante Flotanol D14 em diferentes concentrações sobre o diâmetro médio de Sauter. Observa-se o mesmo comportamento para ambos os *softwares*, indicando que conforme a concentração do espumante aumenta, o diâmetro das bolhas diminui e, conseqüentemente, aumenta o número de bolhas, como efeito direto da redução do efeito de coalescência, até atingir a estabilização, corroborando com vários trabalhos da literatura (Cho e Laskowski, 2002; Grau *et al.*, 2005; Gupta *et al.*, 2007).

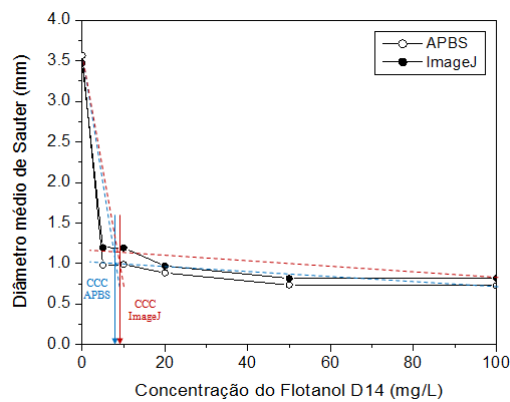


Figura 4. Diâmetro de médio de Sauter em função da concentração do espumante. Comparação entre os dois métodos de processamento de imagem.

Para concentrações de espuma superiores a 10 mg/L praticamente não houve mudança nos valores do diâmetro médio de Sauter, indicando que a concentração de coalescência crítica (CCC) deste espuma encontra-se próximo de 10 mg/L. A partir desta concentração o diâmetro médio ficou estabilizado em 0,8 mm.

A velocidade superficial do ar é outra variável importante no controle do processo de flotação. Com o intuito de avaliar o efeito desse parâmetro sobre o diâmetro médio de bolhas foram realizados ensaios variando a velocidade superficial do ar de 0,25 a 1,25 cm/s para dosagem do espuma de 15 mg/L (acima da CCC). Os resultados estão apresentados na Figura 5. Observa-se que houve um pequeno aumento no tamanho de bolhas com o aumento da velocidade superficial do ar, resultado esperado de acordo com Chaves *et al.* (2010). Porém com a velocidade superficial de ar em 1,25 cm/s observa-se uma diminuição no diâmetro médio de bolhas, podendo ser justificado pelas imagens que nessa condição não ficaram nítidas, já que a velocidade das bolhas era mais alta, influenciando no processamento da imagem.

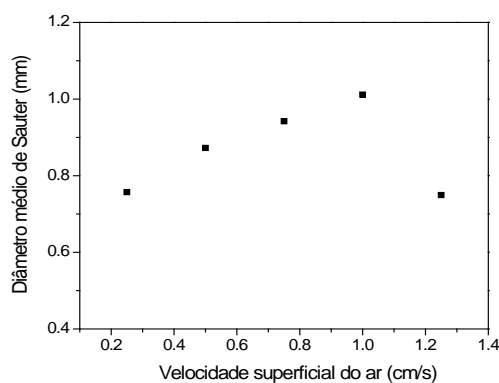


Figura 5. Efeito da velocidade superficial do ar sobre o tamanho de bolhas.

Na Figura 6 foi apresentada a distribuição do tamanho de bolhas, mantendo a concentração do espuma constante (15 mg/L) em diferentes velocidades superficiais do ar (Figura 6a) e, posteriormente, manteve constante a vazão de ar ( $J_g = 0,5$  cm/s) em diferentes concentrações do espuma (Figura 6b). Os resultados apontam que a velocidade superficial do ar interfere de forma menos significativa na distribuição do tamanho de bolhas. Em relação ao espuma, houve uma mudança significativa na distribuição quando a concentração aumenta de 0 para 5 mg/L, porém para valores acima de 5 mg/L, as curvas de distribuição são similares. Esse comportamento vem a confirmar com os resultados do diâmetro médio de Sauter, descritos acima.

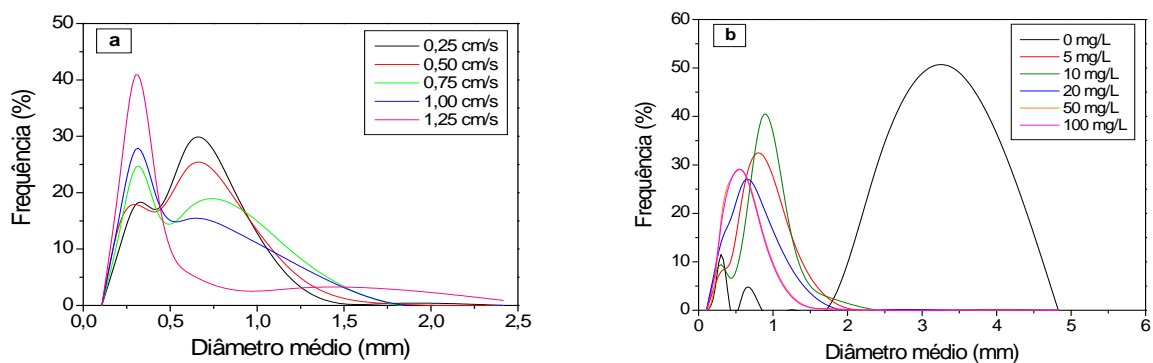


Figura 6. Distribuição dos tamanhos de bolha.

## 5. Conclusão

O tamanho de bolhas gerado foi fortemente influenciado pela concentração do espumante Flotanol D14. Para concentrações superiores a 10 mg/L observou-se pouca influência no diâmetro médio de bolha, sugerindo essa como sendo a concentração crítica de coalescência (CCC). Para concentrações de espumante acima da CCC, o diâmetro médio de bolha foi de aproximadamente 0,8 mm, indicando que este valor seja o menor tamanho médio de bolha produzido por esta coluna com o Flotanol D14 para uma velocidade superficial de ar de 0,5 cm/s.

Comparando os dois *softwares* utilizados para o processamento de imagens, verificou-se que os valores do diâmetro médio de Sauter foram parecidos, indicando que ambos são confiáveis para realizar o processamento e análise das imagens. Cumpre destacar que o software *Bubble Sizer* apresentou um menor número de etapas de processamento de imagens, sendo o mais indicado para este trabalho específico.

## 6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida através do Programa PCI/CETEM/MCTI e ao CETEM pela infraestrutura.

## 7. Referências Bibliográficas

Chaves, A.P., Filho, L.S.L., Braga, P.F.A. Flotação. In Tratamento de Minérios, 5ª Ed., Luz, A.B., Sampaio, J.A., França, S.C.A. (Eds), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p 463-513, 2010.

Cho, Y.S.; Laskowski, J.S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. *International Journal of Mineral Processing*, v. 64, p 69-80, 2002.

Grau, R.A., Laskowski, J.S., Heiskanen, K. Effect of frothers on bubble size. *International Journal of Mineral Processing*, v. 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*, v. 82, p. 126-137, 2007.

Melo, F.; Laskowski, J.S. Fundamental properties of flotation frothers and their effect on flotation. *Minerals Engineering*, v. 19, p. 766-773, 2006.