

# **AVALIAÇÃO DO TAMANHO DE BOLHAS E *HOLD UP* DA COLUNA DE FLOTAÇÃO DE 3" DO CETEM**

## **EVALUATION OF BUBBLE SIZE AND HOLD UP OF CETEM'S 3" FLOTATION COLUMN**

**Estevão Gomes da Cruz Barreto**

Aluno de Graduação da Engenharia Química, 6º período,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)  
Período PIBIC/CETEM: outubro de 2016 a julho de 2017  
ebarreto@cetem.gov.br

**Renata Nigri de Almeida**

Orientadora, Engenheira Química,  
rnigri@cetem.gov.br

**Hudson Jean Bianquini Couto**

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.,  
hcouto@cetem.gov.br

### **RESUMO**

O tamanho de bolhas e o *hold up* do ar são duas das variáveis mais importantes no processo de flotação em coluna, podendo ser controladas por meio de outras variáveis do processo. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar como a velocidade superficial de ar e a concentração de espumante Flotanol D14 podem influenciar ambas as variáveis. As imagens das bolhas em diferentes ensaios foram obtidas utilizando o equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS), sendo posteriormente analisadas utilizando dois softwares distintos: o *Bubble Sizer*, software oficial do APBS, e o *ImageJ*, software livre de análise de imagens. As medidas de *hold up* foram calculadas por meio de valores de diferença de pressão entre dois pontos da coluna de flotação, medidos por dois transmissores de pressão acoplados a esta. A concentração crítica de coalescência (CCC) foi alcançada na concentração de 7 mg/L de Flotanol D14, gerando, para concentrações acima da CCC, bolhas com diâmetro médio de 0,78 mm e 0,99 mm, de acordo com os dados obtidos respectivamente pelo *Bubble Sizer* e pelo *ImageJ*. O *hold up* apresentou uma tendência de aumento linear com o aumento da velocidade superficial do ar. O software *ImageJ* foi considerado mais confiável para análises de tamanho de bolhas, em função do controle das etapas de processamento, a exemplo de filtros de forma e tamanho das bolhas.

**Palavras chave:** tamanho de bolhas, *hold up*, flotação, flotação em coluna.

### **ABSTRACT**

The bubble size and the gas *hold up* are two of the most important variables in the floatation column process and they can be controlled by others process variables. Therefore, the aim of the present paper is to evaluate how the superficial gas velocity and the concentration of the Flotanol D14 frother can influence both of the variables. The images of the bubbles in different tests were obtained using the equipment *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS), so that they could be later analyzed by two different software: the *Bubble Sizer*, the official APBS software, and the *ImageJ*, an open-source software for image analysis. The measurements of the *hold up* were calculated using the pressure difference values between two points of the column, measured by two embedded pressure transmitters. The critical coalescence concentration (CCC) was achieved with 7 mg/L of Flotanol D14, resulting, in concentrations above CCC's, in bubbles with an average diameter of 0,78 mm and 0,99 mm, according to the data obtained by *Bubble Sizer* and *ImageJ*, respectively. The *hold up* presented a tendency for linear increase with the increase of the superficial gas velocity. The software *ImageJ* was considered more reliable because of its control of the processing steps, such as filters of shape and size.

**Keywords:** bubble size, *hold up*, flotation, column flotation.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados atualmente pelas indústrias ligadas ao processamento de minério, diz respeito à recuperação de minerais finos, pois uma parte significativa destas partículas, que possuem valor econômico agregado, acaba sendo rejeitada durante os processos de flotação convencionais (Rubio *et al.*, 2002, Sivamohan, 1990). Esta rejeição indesejada pode ser extremamente influenciada por algumas variáveis ligadas a coluna de flotação, das quais podemos citar o *hold up* do ar (fração volumétrica de ar na coluna) e o tamanho de bolhas, que influenciam diretamente na coleta e transporte das partículas (Alquino *et al.*, 2010). Alguns estudos demonstram que um aumento na concentração de espumante, acarreta em uma diminuição do tamanho de bolhas, diminuindo assim os efeitos de coalescência; porém esta tendência só é observada até certa concentração, denominada concentração crítica de coalescência (CCC), a partir da qual o diâmetro médio de bolhas passa a ser constante (Cho e Laskowski, 2002; Grau *et al.*, 2005).

Desta forma, é possível perceber o quão importante é, para o processo de flotação em coluna, um maior entendimento sobre como o *hold up* do ar e a distribuição de tamanho de bolhas (DTB) são influenciados por outras variáveis ajustáveis do processo, como vazão de ar e concentração de espumante.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo verificar a influência da concentração de espumante e da vazão de ar sobre a DTB e o *hold up* do ar, além de sugerir um método de análise de imagens de tamanho de bolhas, geradas em uma coluna de flotação.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Reagentes

Foi utilizado como agente espumante o Flotanol D14, um polipropileno glicol metiléter fabricado pela *Clariant*. Os ensaios foram realizados utilizando as seguintes concentrações do reagente, em mg/L: 0,0; 2,5; 5,0; 10,0; 20,0 e 50,0.

### 3.2. Coluna de Flotação

Os experimentos foram realizados em uma coluna de flotação de bancada, com 3" (7,6 cm) de diâmetro interno e altura de 159 cm, fabricada em PVC transparente pela *Eriez Minerals Flotation Grup* (Canadá); que funciona acoplada a um conjunto de bombas peristálticas e um sistema de controle de nível, vazão de ar e de água de lavagem.

### 3.3. Obtenção de Imagens

O equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS), fabricado pela *Stone Three* (África do Sul), foi utilizado para a captura de imagens das bolhas. Este é formado por um reservatório graduado, posicionado em sua parte superior e fabricado em acrílico; uma câmara de visualização, formada por uma janela de vidro, com inclinação característica, visando o melhor espalhamento das bolhas em uma única camada, diminuindo assim os efeitos de sobreposição de bolhas; e um compartimento de instalação da câmera fotográfica e da fonte de luz LED.

Com o objetivo de realizar a junção entre o APBS e a coluna de flotação, foi instalado, junto a câmara de visualização, um tubo vertical de 2,5 cm de diâmetro e 20,0 cm de comprimento, seguido por um tubo amostrador de 2,0 cm de diâmetro e 20,0 cm de comprimento, com angulação de 45° em relação a coluna de flotação, pelo qual as bolhas ascendem. Uma câmera digital Canon, modelo PowerShot S95, foi utilizada para captura das imagens das bolhas geradas no processo. Para cada ensaio, identificado por uma determinada concentração de espumante e uma determinada vazão de ar, foram obtidas no mínimo quinze imagens distintas.

### 3.4. Análise de Imagens

Três imagens de cada um dos ensaios foram escolhidas para serem analisadas e processadas por meio de dois *softwares* distintos: o primeiro a ser empregado foi o *Bubble Sizer*, *software* oficial do ABPS, que possui algoritmos desconhecidos no processamento das imagens; o segundo programa utilizado foi o *ImageJ*, *software* livre de análise de imagens, que pode ser obtido gratuitamente na internet.

Como o *ImageJ* possui uma grande gama de recursos, que podem ser utilizados individualmente e em conjunto, foram realizados testes estatísticos com o intuito de definir um procedimento padrão, referente às etapas utilizadas no processamento das imagens, que fosse capaz de obter o maior número de bolhas características do sistema. Sendo assim, as principais ferramentas utilizadas durante o processamento das imagens foram: conversão para 8-bits; *threshold* (linearização); *fill holes* (preenchimento das bolhas demarcadas); *watershed* (segmentação); e *analyze particles* (identificação e análise das bolhas).

### 3.5. Hold Up do Ar

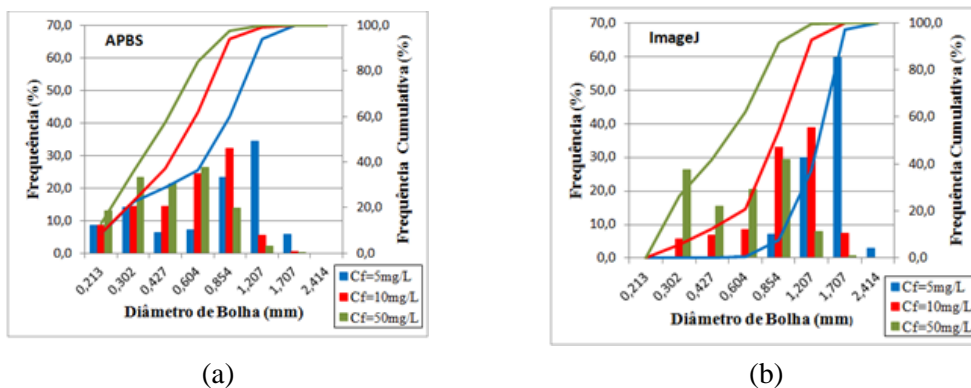
O *hold up* do ar ( $\varepsilon_g$ ) foi medido utilizando dois transmissores de pressão, instalados diretamente na coluna de flotação, em alturas distintas. Por meio da diferença de pressão, medida pelos transmissores, foi possível aplicar a Equação 1 no cálculo desta variável, onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão, medida em kPa,  $\rho_{sl}$  é a densidade da polpa, em  $g/cm^3$ ,  $L$  é a diferença de altura entre os transmissores, em m, e  $g$  é a aceleração da gravidade local, em  $m/s^2$ . Além das variáveis já apresentadas neste trabalho, se faz necessário definir outras duas, para um melhor entendimento sobre os resultados obtidos: a primeira é a velocidade superficial de ar ( $J_g$ ), definida como o quociente entre a vazão de ar ( $Q_g$ ) nas CNTP e a área da seção transversal da coluna ( $A_c$ ); e a segunda é o diâmetro médio de Sauter ( $D_{3,2}$ ), definido como diâmetro médio volume-superfície, calculado pela Equação 2, onde  $d_{bi}$  é o diâmetro de bolha, em uma faixa de tamanho  $i$ , e  $n$  é o número de bolhas dentro desta respectiva faixa.

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} g L} \quad [1]$$

$$D_{3,2} = \frac{\sum n_i \cdot d_{bi}^3}{\sum n_i \cdot d_{bi}^2} \quad [2]$$

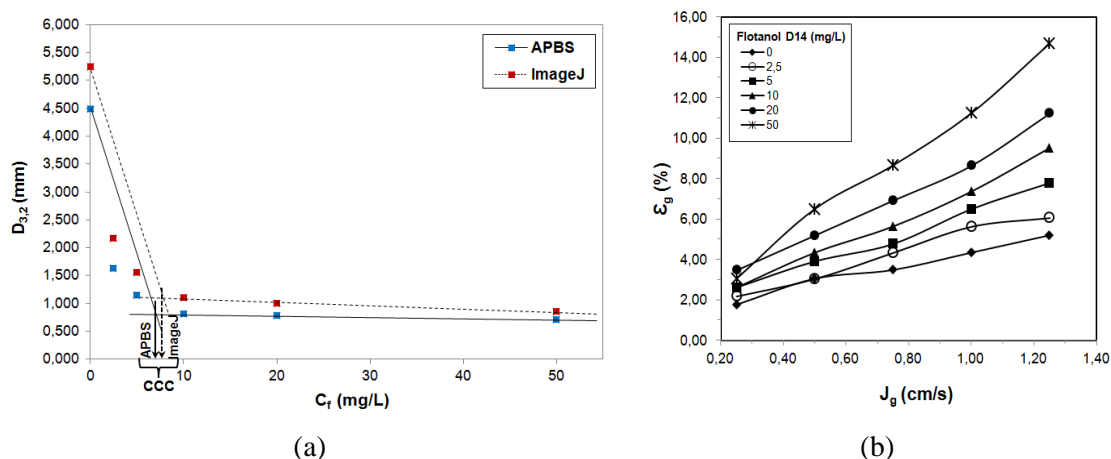
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta dois histogramas da DTB, com dados obtidos separadamente por ambos os *softwares* de análise, referente aos ensaios com concentrações de 5, 10 e 50 mg/L de Flotanol D14 e velocidade superficial do ar de 0,5 cm/s. Os histogramas mostram que o *software Bubble Sizer* (APBS) apresenta uma tendência a processar bolhas com faixas de tamanho menores que as processadas pelo *ImageJ*, o que não necessariamente significa uma melhor qualidade dos resultados obtidos. Por se tratar de um *software* livre, as ferramentas utilizadas no *ImageJ* podem ser adequadas para obterem como resultado apenas bolhas características do processo, o que não pode ser plenamente assegurado utilizando o *Bubble Sizer*, por possuir algoritmo fechado.



**Figura 1:** Histogramas da DTB dos ensaios com  $C_f$  de 5, 10 e 50 mg/L e  $J_g$  de 0,5 cm/s. (a) *Software Bubble Sizer*. (b) *Software ImageJ*.

Na Figura 2(a) é possível observar a influência da concentração do espumante sobre o diâmetro médio de Sauter, com velocidade superficial de ar constante a 0,5 cm/s e a Figura 2(b) apresenta a relação entre o *hold up* do ar e a velocidade superficial de ar, para diferentes concentrações do espumante Flotanol D14.



**Figura 2:** (a) Diâmetro médio de Sauter em função da concentração de espumante. (b) Curvas de *hold up* por  $J_g$  para diferentes concentrações de espumante.

Observando a Figura 2(a), é possível perceber que os resultados obtidos por ambos os *softwares* estão coerentes com trabalhos encontrados na literatura (Cho e Laskowski, 2002; Grau *et al.*, 2005), apresentando uma diminuição do tamanho das bolhas com o aumento da concentração de espumante, até a CCC, a partir da qual o aumento da concentração passa a não influenciar mais significativamente no tamanho das bolhas. A CCC para o Flotanol D14 é obtida na concentração de 7 mg/L, quando a  $J_g$  é de 0,5 cm/s, gerando assim bolhas com tamanho médio de aproximadamente 0,78 mm, para o *Bubble Sizer*, e 0,99 mm, para o *ImageJ*, reafirmando a tendência que o primeiro *software* possui de processar bolhas com faixas de tamanho menores.

Na Figura 2(b), para todas as concentrações analisadas, foi possível observar que o *hold up* do ar cresce de forma majoritariamente linear com o aumento da velocidade superficial do ar, devido ao aumento do número de bolhas, assumindo valores ainda maiores com o aumento da concentração de espumante, conforme citado por Finch e Dobby (1990).

## 5. CONCLUSÕES

O aumento da concentração de Flotanol D14 levou à diminuições significativas no tamanho médio das bolhas, até a concentração de 7 mg/L (CCC), a partir da qual o tamanho das bolhas passa a ser aproximadamente constante, assumindo o diâmetro médio de 0,78 mm e 0,99 mm, de acordo, respectivamente, com os dados gerados pelos softwares *Bubble Sizer* e *ImageJ*. O *hold up* do ar apresentou tendência a aumentar de forma linear com o aumento da velocidade superficial do ar e a assumir valores mais elevados com o aumento da concentração. O diâmetro médio de Sauter gerado por ambos os softwares foram relativamente próximos, atestando a confiabilidade do método de medida; porém, o *Bubble Sizer* apresentou tendência a processar bolhas com faixas de tamanho menores, que podem não se tratar de bolhas características do processo, demonstrando a maior confiabilidade dos dados gerados pelo *ImageJ*, por se tratar de um software livre, em que se tem domínio sobre o processamento de imagem.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica e ao CETEM pela infraestrutura.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUINO, J. A., OLIVEIRA, M. L. M., FERNANDES, M. D. Flotação em coluna. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. (Eds) Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, 2010. p 515-556.
- 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.
- FINCH, J. A., DOBBY, G. S. **Column Flotation**. 1 ed. Pergamon Press, Great Britain. 1990.
- 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.
- RUBIO, J., SOUZA, M. L., SMITH, R. W., Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals Engineering**, v.15, p. 139–155, 2002.
- SIVAMOHAN, R., The problem of recovering very fine particles in mineral processing – a review, **International Journal of Mineral Processing**, v. 28, p. 247-288, 1990.