

# ESTUDO DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE BOLHAS EM SISTEMA TRIFÁSICO DE FLOTAÇÃO POR ANÁLISE DE IMAGEM

## STUDY OF BUBBLE SIZE DISTRIBUTION IN A THREE-PHASE FLOTATION SYSTEM BY IMAGE ANALYSIS

**Pedro Schulz e Silva Rangel**

Aluno de Graduação em Engenharia Química, 13º período,  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)  
Período de estágio: setembro de 2019 a novembro de 2020,  
pedrorangel@aluno.puc-rio.br

**Hudson Jean Bianchini Couto**

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

### RESUMO

Uma das variáveis mais importantes em sistemas de flotação aerados é o tamanho de bolha, devido ao seu efeito na eficiência de coleta e de transporte de partículas. Sabe-se que quanto menor o tamanho das bolhas geradas, maior é a área de contato bolha-partícula, o que aumenta as chances de colisão e de adesão, contribuindo para a recuperação do processo. Nesse contexto, o tamanho médio e a distribuição de tamanho de bolha (DTB) são variáveis chave em processos de flotação e o ajuste desses parâmetros depende da adição de um reagente espumante capaz de inibir a coalescência de bolhas, sob condições de concentração estabelecidas. Dessa forma, o presente estudo avaliou o tamanho médio e a DTB em sistema trifásico para uma célula de flotação mecânica *Magotteaux*. A DTB foi medida por técnica de Análise e Processamento de Imagens Digitais, utilizando o software comercial *ImageJ*<sup>®</sup>. As medidas de DTB revelaram que o perfil de tamanho médio das bolhas foi decrescente com o aumento na concentração do espumante MIBC, até atingir um diâmetro mínimo de 541  $\mu\text{m}$  para 20  $\text{mg.L}^{-1}$  deste espumante. Acima desta concentração, houve pequena flutuação do diâmetro médio, indicando o potencial do espumante MIBC na inibição da coalescência das bolhas em torno de 20  $\text{mg.L}^{-1}$ . O efeito da presença de partículas de um mineral sulfetado em medidas de tensão superficial foi investigado para os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC. Tais reagentes apresentaram diferentes comportamentos com respeito às interações mineral-espumante em um sistema trifásico.

**Palavras-chave:** Sistema trifásico; tamanho de bolha; espumante; coalescência; imagens digitais.

### ABSTRACT

One of the most important variables to consider in air flotation systems is bubble size, due to its efficiency in collecting and transporting mineral particles. It is well established that the smaller the air bubble size is, the greater will be the bubble-particle contact area, leading to high probabilities of collision and adhesion between bubbles and mineral particles. Furthermore, bubble size average and size distribution of bubbles are key parameters in froth flotation, and thus need to be controlled by the addition of a frother capable of inhibit bubble coalescence under established conditions. Regarding the effect of frothers in bubble size, this study aimed to investigate the bubble size distribution (BSD) in a three-phase system during flotation experiments carried in a single laboratory scale mechanical cell *Magotteaux*. The BSD was measured by Digital Image Processing and analysis, using *ImageJ*<sup>®</sup> software. Those bubble size measurements shown that the average size of bubbles decreased with the increase of the frother

(MIBC) concentration until the average bubble size reached a minimum of 541  $\mu\text{m}$  under 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  of MIBC. Above this concentration level, there was a slightly increase of bubble size to 574  $\mu\text{m}$ , showing there was an inhibition of bubble coalescence in the presence of a MIBC 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  solution. The effect of mineral particles regarding surface tension measurements was studied for AeroFroth 65, Flotanol D14 and MIBC. These frothers showed differences in their behaviour concerning mineral-frother interactions in a three-phase system.

**Keywords:** Three-phase system; bubble size; frother; coalescence; digital image.

## 1. INTRODUÇÃO

A eficiência do processo de flotação depende de um conjunto de variáveis que afetam as propriedades físico-químicas e as condições hidrodinâmicas em um sistema trifásico (sólido-líquido-gás). Uma das variáveis mais importantes em sistemas de flotação aerados é o tamanho de bolha, devido ao seu efeito na eficiência de coleta e de transporte de partículas minerais. Sabe-se que quanto menor o tamanho das bolhas geradas, maior é a área interfacial de contato, e, portanto, maior será a probabilidade de colisão bolha-partícula.

Por outro lado, bolhas de tamanhos muito reduzidos (40-100  $\mu\text{m}$ ) podem apresentar baixa velocidade de ascensão, muitas vezes inferior à velocidade descendente da polpa. Neste caso, a baixa velocidade de ascensão das microbolhas pode levar a perdas indesejáveis de partículas minerais de interesse no rejeito. Portanto, uma boa prática é o ajuste da distribuição de tamanho de bolhas em células de flotação, que pode ser feito pelo controle de variáveis operacionais, tais como a vazão de ar, e/ou pela dosagem de tensoativos, a exemplo de espumantes.

Os espumantes são tensoativos utilizados no aprimoramento da dispersão de bolhas de ar em máquinas de flotação, além de contribuírem para a estabilização da espuma. Tais reagentes se acumulam preferencialmente na interface ar-solução e interagem com moléculas coletoras adsorvidas em partículas minerais no momento de colisão bolha-partícula. Uma importante contribuição de um espumante é o seu efeito na redução do tamanho de bolha, o qual pode ser explicado pela sua capacidade de retardar a coalescência de bolhas (CHO e LASKOWSKI, 2002).

Diversos autores reportam métodos utilizados na determinação e no controle da distribuição de tamanho de bolhas (DTB) em sistema bifásico (ar-solução), tais como: o uso de correlações fluidodinâmicas, medidas de eletro-resistividade, difração laser e análise de fotografias (GRAU et al., 2005). No entanto, são poucos os estudos de tamanho de bolha que foram conduzidos em células de flotação de escala laboratorial e, em particular, em sistema trifásico (GRAU e HEISKANENH, 2005). Nesse contexto, o desenvolvimento de uma metodologia baseada no processamento e análise de imagens digitais capturadas em sistema trifásico se revela uma alternativa promissora para o estudo da DTB em células mecânicas de flotação.

## 2. OBJETIVOS

Estudar a distribuição de tamanho de bolhas (DTB) em sistema trifásico de flotação em uma célula mecânica *Magotteaux* do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) para os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Reagentes

Os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC foram utilizados em ensaios de tensão superficial e em testes de flotação. Os depressores metabissulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) e sulfato de zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ), bem como o coletor FloMin C-3330 foram empregados como reagentes durante os ensaios de flotação. Para o ajuste de pH, foi adicionada à célula de flotação uma solução de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) diluída em água.

### 3.2 Amostra Mineral

Uma amostra de minério sulfetado, com cerca de 1% (em massa) de chumbo e 0,7% de zinco, foi utilizada em ensaios de tensão superficial e em testes de flotação. O minério foi obtido de um depósito localizado no Estado do Rio Grande do Sul, no Brasil. Nas instalações do CETEM, no Rio de Janeiro, o minério foi homogeneizado, quarteado e armazenado em alíquotas de 3 kg. Em seguida, as alíquotas de minério foram destinadas às etapas de britagem e moagem para redução do seu tamanho e liberação dos minerais de interesse. A moagem do minério foi realizada em um moinho de barras, até a obtenção de uma granulometria característica de  $P_{80}=125 \mu\text{m}$ . Em seguida, o minério foi quarteado até a obtenção de 1 kg e a amostra remanescente foi quarteada até a obtenção de 50 g.

### 3.3 Ensaios de Tensão Superficial

Para avaliar o efeito da presença de sólido nas medidas de tensão superficial das soluções de espumantes em estudo, uma etapa prévia de contato e condicionamento dos espumantes foi realizada. A polpa obtida após a etapa de condicionamento foi transferida a tubos de vidro que por sua vez foram alocados em uma centrífuga. Foi utilizada uma rotação de 1000 rpm durante 2 minutos visando à clarificação da solução de espumante. Em seguida, o sobrenadante foi transferido a um balão de 100 mL com o auxílio de uma pipeta volumétrica. As soluções de um mesmo espumante foram encaminhadas para leitura de tensão superficial, utilizando o tensiômetro K100 e uma placa de platina de geometria retangular.

### 3.4 Testes de Flotação

Os testes de flotação foram desenvolvidos em uma célula mecânica *Magotteaux* modelo FM001 equipada com uma cuba de 3 L e acoplada a um agitador mecânico. O agitador foi alimentado com ar comprimido a uma vazão de  $3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  controlada por meio de um rotâmetro. As condições operacionais de rotação mecânica (1000 rpm), percentual de sólidos (25%) e dosagens dos depressores  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  e  $\text{ZnSO}_4$ , bem como do coletor FloMin C-3330 utilizado foram mantidas constantes, enquanto que o tipo de espumante utilizado (AeroFroth 65; Flotanol D14; MIBC) e a sua dosagem ( $3\text{-}67 \text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ ) foram variáveis do processo.

### 3.5 Captura de Imagens Digitais

O equipamento *Anglo Platinum BubbleSizer* (APBS), comercializado pela empresa *Stone Three Mining* (África do Sul), foi acoplado à célula de flotação para visualização de bolhas de ar comprimido durante os testes de flotação. As bolhas foram fotografadas por uma câmera digital *Canon Power Shot S95* acoplada ao equipamento APBS durante os ensaios.

### 3.6 Processamento e Análise de Imagens Digitais

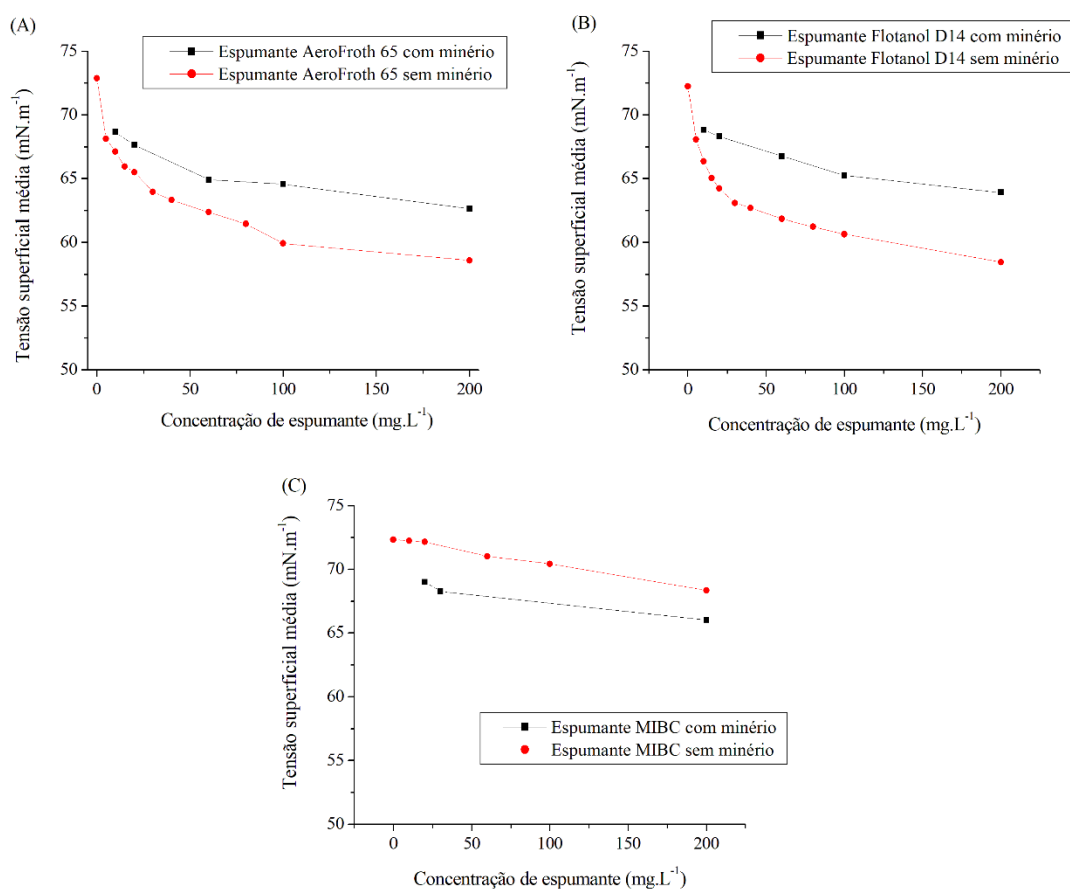
As imagens digitais foram processadas e analisadas utilizando o software comercial *ImageJ*<sup>®</sup> versão 1.36b. Para o processamento de imagens, as seguintes etapas foram realizadas: seleção dos arquivos; definição de escala ( $23,482 \text{ pixels}\cdot\text{mm}^{-1}$ ); seleção retangular e recorte da região selecionada; conversão de imagem colorida em monocromática (256 tons de cinza – 8 bits); definição de filtro de banda (3 - 40 pixels); limiarização de imagem (opção média); preenchimento das bolhas; segmentação e análise das partículas. Para as partículas (bolhas) analisadas, foi escolhida a faixa de área de  $0,008$  a  $12,0 \text{ mm}^2$  e adotada faixa de circularidade de  $0,8$  a  $1$ . Ao final do processamento de imagens, dados de área das partículas foram gerados e utilizados em planilhas Excel para obter parâmetros relevantes ao estudo de DTB, incluindo o diâmetro médio de Sauter das bolhas ( $D_{3,2}$ ) (Equação 1) e histogramas de frequência (%) por faixas de tamanho (mm). Tais parâmetros foram gerados por código programado na linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) da *Microsoft*.

$$D_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i * D_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i * D_i^2} \quad (1)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Tensão Superficial dos Espumantes

Os valores médios de tensão superficial dos espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC são apresentados na Figura 1. Os dados revelam que a presença do minério em solução ocasionou o aumento da tensão superficial média para os espumantes AeroFroth 65 e Flotanol D14. Possivelmente, o aumento na tensão superficial destes dois espumantes está associado à capacidade das suas moléculas adsorverem na superfície de sólidos minerais sulfetados, mesmo na ausência de um reagente coletor e em baixas concentrações (10-200 mg.L<sup>-1</sup>). No caso do espumante MIBC, a presença de partículas minerais levou a uma redução da tensão superficial média. Este efeito foi inesperado e ainda será elucidado com novos ensaios e estudos específicos para uma explicação plausível.



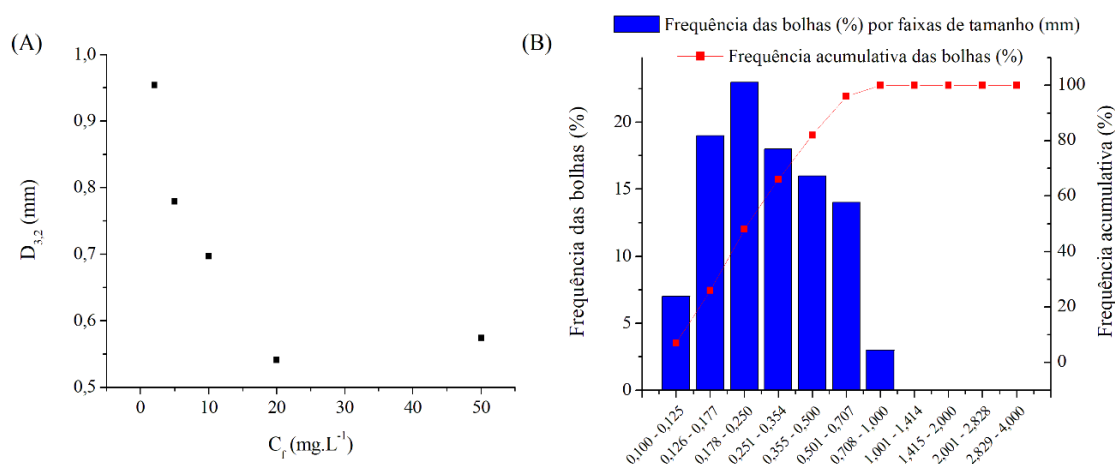
**Figura 1:** Medidas de tensão superficial para diversas concentrações dos espumantes AeroFroth 65 (A), Flotanol D14 (B) e MIBC (C) em duas condições experimentais: espumantes em contato com partículas minerais (curva em preto) e espumantes sem minério (curva em vermelho).

### 4.2 Distribuição de Tamanho de Bolhas

Os perfis de distribuição de tamanho de bolhas (DTB) foram obtidos no formato de histogramas de frequência (%) *versus* faixas de tamanho (mm) para o espumante MIBC e revelaram que a distribuição de tamanho de bolhas se torna mais dispersa, alcançando faixas de maior tamanho (0,501 a 1,414 mm) com o aumento na concentração deste espumante. Tal resultado sugere que a presença do espumante MIBC em sistema trifásico de flotação levaria a um aumento na dispersão de bolhas e à redução do seu tamanho médio.

### 4.3 Diâmetro Médio das Bolhas

O efeito da presença do espumante MIBC no tamanho médio de bolhas de ar disperso em sistema trifásico de flotação foi investigado pelo processamento de imagens digitais, através do qual foram gerados dados de diâmetro médio de Sauter ( $D_{3,2}$ ) das bolhas para diversas concentrações do espumante em estudo (2-50  $\text{mg.L}^{-1}$ ), conforme ilustra a Figura 2. Os dados de diâmetro médio das bolhas indicaram um perfil decrescente com o aumento progressivo na concentração do espumante MIBC, até um certo valor mínimo de diâmetro ( $D_{3,2} = 541 \mu\text{m}$ ) atingido na presença de 20  $\text{mg.L}^{-1}$  deste espumante. Acima desta concentração (50  $\text{mg.L}^{-1}$ ), houve pequena flutuação do diâmetro médio ( $D_{3,2} = 574 \mu\text{m}$ ), o que sugere que a coalescência das bolhas pode ter sido inibida na presença do espumante MIBC em concentrações acima de 20  $\text{mg.L}^{-1}$ , indicando ser este o valor da concentração crítica de coalescência – CCC.



**Figura 2:** Dados de diâmetro médio de Sauter ( $D_{3,2}$ ) (A) obtidos para o espumante MIBC em diversas concentrações (2-50  $\text{mg.L}^{-1}$ ) e histograma de frequência das bolhas (B) para 20  $\text{mg.L}^{-1}$  de MIBC.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo, verificou-se o efeito da concentração do espumante MIBC no tamanho médio e na distribuição de tamanho de bolhas (DTB), bem como o efeito da presença de partículas de um minério sulfetado em medidas de tensão superficial dos espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC. Foi constatado que a DTB se tornou mais dispersa com o aumento na concentração do espumante MIBC e que o tamanho médio das bolhas foi reduzido até 541  $\mu\text{m}$  em um valor crítico de 20  $\text{mg.L}^{-1}$ . Acima desta concentração, houve pequena flutuação do diâmetro médio, o que pode ser um indício da capacidade deste espumante inibir a coalescência das bolhas em torno de 20  $\text{mg.L}^{-1}$ . As medidas de tensão superficial realizadas para os espumantes na presença de partículas minerais revelaram que, em média, houve um aumento na tensão superficial dos espumantes AeroFroth 65 e Flotanol D14, enquanto que, para o espumante MIBC, houve uma redução da sua tensão superficial média. Tais evidências sugerem que os espumantes em estudo são capazes de interagir com as partículas, de tal forma que suas moléculas adsorvem na interface sólido-líquido, mesmo na ausência de reagentes coletores e para baixas concentrações (10-200  $\text{mg.L}^{-1}$ ). Estudos adicionais estão sendo realizados para melhor elucidar alguns resultados encontrados.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio dos engenheiros Hudson J. B. Couto, João L. S. Alves e Renata N. de Almeida, ao CNPq, à AGIEL e ao CETEM.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

CHO, Y.; LASKOWSKI, J. S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. **International Journal of Mineral Processing**, v. 64, n. 2-3, p. 69-80, 2002.

GRAU, R. A.; HEISKANEN, K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 12, p. 1164-1172, 2005.

GRAU, R. A.; LASKOWSKI, J. S.; HEISKANEN, K. Effect of frothers on bubble size. **International Journal of Mineral Processing**, v. 76, n. 4, p. 225-233, 2005.