

# A INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE BOLHAS (DTB) EM SISTEMA TRIFÁSICO DE FLOTAÇÃO POR ANÁLISE DE IMAGEM

## THE INFLUENCE OF OPERATIONAL VARIABLES ON THE DISTRIBUTION OF BUBBLE SIZE (DTB) IN A THREE-PHASE FLOTATION SYSTEM BY IMAGE ANALYSIS

**Aline Silva Costa**

Aluno de Graduação em Química industrial, 3º período  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ  
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: setembro de 2023 a agosto de 2024  
Aline\_costa510@eq.ufjf.br

**Hudson Jean Bianquini Couto**

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

**Luiz Felipe Alves dos Santos**

Coorientador, Engenheiro de Minas, B.Sc.  
lfsantos@cetem.gov.br

### RESUMO

Uma das maiores dificuldades na área de processamento mineral é a recuperação de partículas finas por flotação convencional. Neste contexto, a distribuição do tamanho de bolha (DTB) é uma variável crucial pra solucionar esse problema já que ela proporciona uma melhor eficiência na coleta e no transporte das partículas, podendo ser afetada por outras variáveis do processo. Desta forma, o presente trabalho avaliou a influência da velocidade de rotação e vazão de ar na distribuição do tamanho de bolha em uma célula de flotação *Magotteaux* em sistema trifásico para uma dosagem de 20 mg/L de espumante Senfroth 6005. As imagens das bolhas foram capturadas usando o equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS), sendo em seguida analisadas por meio de dois softwares distintos o *ImageJ* e APBS. Os resultados obtidos pelos respectivos softwares demonstraram que o a rotação de 800 rpm apresenta uma distribuição de tamanho de bolha mais favorável com o menor  $d_{3,2}$  de 0,4 mm e que vazão de ar de 3 L/min resultou na distribuição de bolha mais eficiente com o menor  $d_{3,2}$  de 0,4 mm. Ao comparar os dois softwares o APBS detectou faixas de diâmetros médio de Sauter menores enquanto o *ImageJ* permitiu um maior controle no processamento das imagens. Faz-se necessário mais estudos com o objetivo de entender melhor o comportamento das bolhas com esse material.

**Palavras-chave:** variáveis operacionais, sistema trifásico, flotação.

### ABSTRACT

One of the biggest difficulties in the area of mineral processing is the recovery of fine particles by conventional flotation. In this context, bubble size distribution (DTB) is a crucial variable to solve this problem as it provides better efficiency in particle collection and transport, and can be affected by other process variables. Thus, the present work evaluated the influence of rotation speed and air flow on the bubble size distribution in a Magotteaux flotation cell in a three-phase system for a dosage of 20 mg/L of Senfroth 6005 sparkling wine. The images of the bubbles were captured using the Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS) equipment, and then analyzed using two different software programs, ImageJ and APBS. The results obtained by the respective software demonstrated that the rotation of 800 rpm presents a more favorable bubble size distribution with the smallest  $d_{3,2}$  of 0.4 mm and that an air flow of 3 L/min resulted in the most efficient bubble distribution. Wwith the smallest  $d_{3,2}$

of 0.4 mm. When comparing the two software, APBS detected bands of smaller Sauter mean diameters while ImageJ allowed greater control in image processing. More studies are needed to better understand the behavior of bubbles with this material.

**Keywords:** operational variables, three-phase system, flotation.

## 1. INTRODUÇÃO

O beneficiamento mineral consiste em um conjunto de operações que visam aumentar o teor dos minerais de interesse. Atualmente, a flotação é o principal método de concentração desses minerais, na qual é definida por um processo físico-químico de separação de partículas em uma suspensão pela adesão de bolhas de ar (RUBIO et al., 2002).

Contudo, uma das maiores dificuldades na área de processamento mineral é a recuperação de partículas finas por flotação convencional. Estima-se que milhões de toneladas de minerais são perdidas nas frações finas. Isso ocorre, principalmente devido à baixa probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas (SUBRAHMANYAM; FORSSBERG, 1990).

Neste contexto, uma alternativa para contornar esse problema seria determinar uma extensa variação na distribuição do tamanho das bolhas (DTB) dentro de uma célula de flotação, pois elas são parâmetros importantes nesse processo, uma vez que influenciam na eficiência da coleta e do transporte de partículas. Sendo o seu controle crucial para maximizar a seletividade da flotação que poderá ser ajustado por meios de variáveis operacionais tal como a vazão de ar, rotação e pela a adição de soluções de tensoativos (AQUINO et al., 2004).

Nos últimos anos, diversos autores (AQUINO et al., 2004; FINCH e DOBBY, 2002; GRAU et al., 2005; RODRIGUES e RUBIO,2003) reportaram métodos utilizados na determinação e no controle DTB, tais como: o uso de correlações fluidodinâmicas, medidas de eletro-resistividade, difração laser e análise de fotografias. Os métodos fotográficos em combinação com o processamento de imagens digitais mostram ser uma solução promissora para medições de tamanho de bolha em sistemas trifásicos.

## 2. OBJETIVO

Este presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da rotação e da vazão de ar na distribuição de tamanho de bolha em sistema trifásico e determinar a melhor condição dessas variáveis operacionais para estudos posteriores com o mesmo minério, determinar o diâmetro médio de Sauter ( $D_{32}$ ) obtidos em sistema trifásico e comparar os softwares APBS e *ImageJ* quanto o seu processamento das imagens resultados obtidos.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Amostra e Reagentes

Para a execução desse estudo foi utilizado um rejeito *rougher +scavenger* proveniente de uma planta de beneficiamento mineral de cobre. Foi realizada a caracterização mineralógica (DRX) e caracterização física (granulometria e picnometria). O espumante senfroth 6005 (1%) e o coletor senkol 2 (0,2%) foram utilizados durante os testes de flotação. Para o ajuste de pH foi adicionado a célula de flotação uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 5%.

### 3.2 Teste de Flotação

Os testes foram conduzidos utilizando uma célula mecânica *Magotteaux* modelo FM001, disponível no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), equipada com uma cuba de acrílico de 3L, a qual foi acoplada a um agitador mecânico. Antes da etapa de flotação, foi condicionada uma alíquota de 1kg da amostra com coletor Senkol 2 de dosagem de 7 g/t por 2 minutos, seguido do Senfroth 6005 a uma dosagem de 20 mg/L por 1 minuto. Posteriormente, o pH foi

ajustado para 10,5 com uma solução de NaOH a 5%. Os testes foram realizados em duas etapas distintas, cada uma variando uma condição operacional específica. Na primeira etapa, foram testadas as velocidades de rotação de 600, 800 e 1000 rpm, controlada através do painel do equipamento, enquanto a vazão de ar foi mantida constante em 3L/min. Na segunda etapa, testou-se a vazão de ar de 1, 2, 3 e 4 L/min, utilizando rotação com a melhor distribuição de tamanho de bolha da etapa anterior.

### 3.3 Captura das Imagens

Para captura e visualização das bolhas durante os testes de flotação foi utilizado o equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) comercializado pela empresa Stone Three Mining (África do Sul). As bolhas foram fotografadas com auxílio da câmera digital Canon, modelo *Power Shot S95*.

### 3.4 Análise e Processamento de Imagens

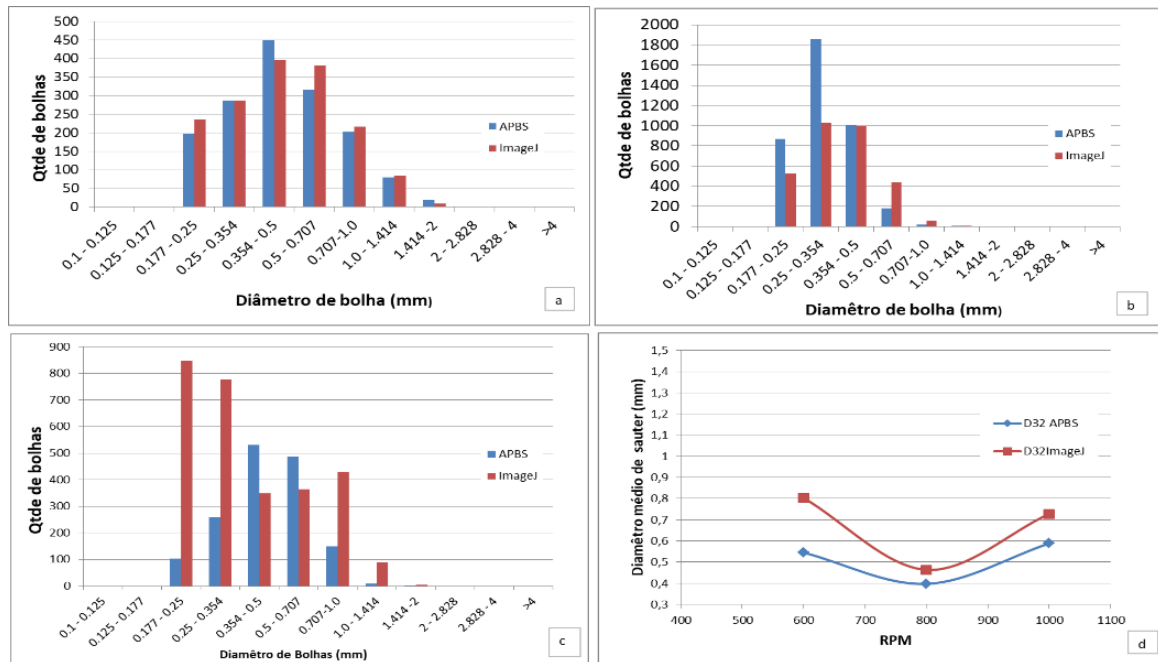
Foram escolhidas, no mínimo, três imagens de cada ensaio para serem analisadas e processadas por meio dos softwares *ImageJ* e o *Bubble sizer* (APBS). O *ImageJ* é um software para processamento e análise de imagens de código aberto, desenvolvido por *Wayne Rasband no National Institute of Mental Health, USA*, em linguagem Java. Durante os testes ele foi adaptado por meio de macros que permitiu acelerar o processamento, já o APBS é um software pago desenvolvido pela empresa *Stone Three mining solutions* para processar imagens capturadas do *Bubble Sizer*.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Rotação e Vazão de Ar

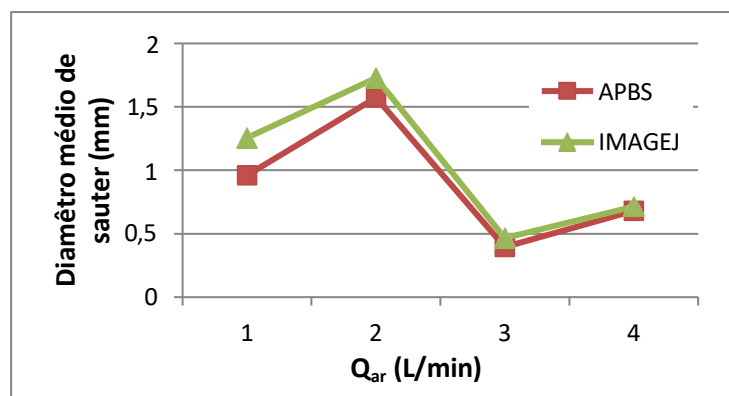
Os dados da Figura 1 foram processados e analisados nos softwares APBS e *ImageJ* e revelam uma relação significativa entre a rotação do agitador e o tamanho das bolhas no processo de flotação. Em rotações mais baixas, como 600 rpm (Figura 1(a)), embora a distribuição se assemelhe à de 800 rpm (Figura 1(b)), observa-se que as bolhas apresentam um intervalo mais extenso de 0,5 a 2 mm na distribuição de bolhas. Essas, localizadas mais à direita do gráfico, possuem menor área superficial disponível para a adesão de partículas e tendem a coalescer mais facilmente. Na Figura 1(b), as bolhas se concentram principalmente na faixa de diâmetros médios e pequenos à esquerda do gráfico (intervalo de 0,177 e 1 mm), representando a melhor distribuição entre as três rotações estudadas. Além disso, essa rotação (800 rpm) também resultou na maior produção de bolhas com aproximadamente 2000 bolhas na faixa de 0,25 a 0,354 mm. Já a rotação de 1000 rpm, representada na Figura 1(c), observou-se um aumento na faixa de distribuição com intervalo de 0,177 a 2 mm e uma menor formação de quantidades de bolhas em comparação com a de 800 rpm.

A Figura 1 (d), apresenta a variação do diâmetro médio de Sauter ( $D_{3,2}$ ) em função da rotação do agitador. Nota-se que nas rotações de 600 e 1000, resultam em maiores diâmetros 0,9 e 0,7 mm para o *ImageJ* e para o APBS apresentam valores de 0,5 e 0,6 mm, respectivamente. Em contraste, a rotação de 800 rpm exibe os menores  $D_{3,2}$  para ambos os *softwares* com valores de 0,4 mm para o APBS e 0,5 mm para o *ImageJ*, indicando uma distribuição mais estável durante o processo de flotação. Além disso, foi observado que o software APBS foi capaz de identificar faixas de diâmetros menores em comparação com o *ImageJ*. Esses Resultados obtidos para o  $D_{32}$  diferem da literatura, que sugere que o  $D_{32}$  diminui conforme a velocidade de rotação é aumentada como observado por Grau e Heiskanen (2005).



**Figura 1:** Diâmetro médio de Sauter e distribuição do tamanho de bolhas para rotações de 600 rpm (a), 800 rpm (b), 100 rpm (c), D32 referente a cada rotação (d).

Na Figura 2, ao apresentar o diâmetro médio de Sauter ( $D_{3,2}$ ) em função da vazão de ar, observou-se que os menores fluxos de ar, como 1 L/min e 2 L/min, resultaram em diâmetros médios elevados de 1,2 mm e 1,8 mm (*ImageJ*), respectivamente. A vazão de 3 L/min apresentou o menor  $D_{3,2}$ , de 0,4 mm (APBS), indicando a melhor vazão entre os experimentos conduzidos. No entanto, ao aumentar a vazão para 4 L/min, o diâmetro médio das bolhas voltou a aumentar, atingindo 0,8 mm (*imageJ* e APBS). Segundo Gorain, Franzidis e Manlapig (1995) o diâmetro médio aumenta conforme há um aumento do Vazão de ar. Além disso, foi possível verificar que o APBS detectou faixas menores de diâmetros comparado ao *ImageJ*.



**Figura 2:** O diâmetro médio de sauter ( $D_{3,2}$ ) em função da vazão de ar analisados pelos softwares APBS (vermelho) e ImageJ (verde).

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo investigou a influência de variáveis operacionais como velocidade de rotação e vazão de ar em um sistema trifásico de flotação. Constatou-se que tanto o aumento na velocidade de rotação quanto na vazão de ar resultou em bolhas maiores e um diâmetro médio de Sauter mais elevado, resultando em condições de flotação menos eficientes. Em contrapartida, rotações e vazões menores, apesar de apresentarem uma ampla faixa de distribuição de tamanho de bolhas (DTB), mostraram um diâmetro médio maior em comparação

com os valores intermediários das variáveis operacionais, o que difere da literatura, reforçando a necessidade de novos estudos para confirmar esses dados, também se faz necessário investigar a influência da granulometria e a porcentagem de sólidos. Conseqüentemente, determinou-se que 800 rpm e 3 L/min representam as condições ideais para futuros trabalhos, oferecendo a melhor distribuição de tamanho de bolhas e o menor valor de  $D_{3,2}$ , que foi medido em 0,4 mm. Além disso, ambos os softwares apresentaram valores de  $D_{32}$  ligeiramente próximos, porém o APBS em todos os testes apresentou valores mais baixos que o *ImageJ*, enquanto que este último permitiu um maior controle do operador no processamento das imagens.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Hudson J.B. Couto e Felipe Alves, 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: Tratamento de Minérios (Luz, A.B.; Sampaio, J.A.; Almeida, S.L.M., Editores), CETEM/MCT, 4a. ed.; Rio de Janeiro; 2004.

FINCH, J.A., DOBBY, G.S. Column Flotation. 1 ed. Pergamon Press, Great Britain. 1990.

GORAIN, B.K.; FRANZIDIS, J.P. and MANLAPIG, E.V. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. *Minerals Engineering*, vol. 8, nr. 6, pp. 615-635, 1995.

GRAU, R.A.; HEISKANEN, K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells. *Minerals Engineering*, vol. 18, Issue 12, 2005.

RODRIGUES, R.T., RUBIO, J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. *Minerals Engineering*, 2003; 16, 757-765.

RUBIO, J., SOUZA, M.L., SMITH, R.W., Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, vol.15, p. 139-155, 2002.

RUBIO, J.; SOUZA, M.L.; SMITH, R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, vol.15, p. 139-155, 2002.

SUBRAHMANYAN, T.V.; FOSSBERG, E.F.S. Fine particle processing: Shear flocculation and carrier flotation – a review. *International Journal of Mineral Processing*, 30, pp. 265-286, 1990.