

A INFLUÊNCIA DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS NA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE BOLHAS EM FLOTAÇÃO

THE INFLUENCE OF SOLIDS CONTENT ON BUBBLE SIZE DISTRIBUTION IN FLOTATION

Aline Silva Costa

Aluno de Graduação em química industrial, 7º período
Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: setembro de 2025 a agosto de 2026
aline_costa510@eq.ufrj.br

Hudson Jean Bianquini Couto

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

RESUMO

A distribuição do tamanho de bolhas (DTB) desempenha papel fundamental no desempenho da flotação, uma vez que influencia a interação entre partículas minerais e bolhas de ar. Entre os fatores que afetam esse parâmetro, destaca-se a porcentagem de sólidos da polpa, capaz de modificar propriedades físico-hidrodinâmicas do meio e, consequentemente, os mecanismos de quebra e coalescência das bolhas. Nesse contexto, o presente trabalho analisou a influência da porcentagem de sólidos sobre a DTB em uma célula mecânica de flotação *Magotteaux*, considerando as porcentagens de sólidos de 0, 10, 20, 30 e 40% e comparou o desempenho dos espumantes CADM 24-350 e Senfroth 100. As imagens das bolhas foram obtidas utilizando o equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) e posteriormente processadas no *software* APBS para a determinação da distribuição do tamanho de bolhas e do diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$). Os resultados mostraram que o aumento da porcentagem de sólidos promoveu o aumento do $D_{3,2}$ para ambos os espumantes até a condição de 30%. O espumante CADM 24-350 apresentou maior sensibilidade evidenciada pelo aumento mais acentuado do $D_{3,2}$ (0,61 para 1,02 mm) e pela extensa faixa de distribuição do tamanho de bolhas, enquanto o Senfroth 100 apresentou comportamento mais estável, com variações concentrada entre 0,25 e 0,50 mm na DTB ao longo das condições avaliadas. Na condição de 40% (m/m), observou-se uma redução do $D_{3,2}$ para ambos os espumantes.

Palavras chave: Bolhas; sistema trifásico; análise de imagens; porcentagem de sólidos; distribuição de tamanho de bolha; espumante.

ABSTRACT

Bubble size distribution (BSD) plays a fundamental role in flotation performance, as it directly influences the interaction between mineral particles and air bubbles. Among the factors affecting this parameter, the pulp solids concentration stands out due to its influence on the hydrodynamic properties of the system and, consequently, on the mechanisms of bubble breakup and coalescence. In this context, the present study evaluated the influence of solids concentration on BSD in a *Magotteaux* mechanical flotation cell, considering solids contents of 0, 10, 20, 30, and 40%, and compared the performance of the furthers CADM 24-350 and Senfroth 100. Bubble images were acquired using the *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) system and subsequently processed with the APBS software to determine the bubble size distribution and the Sauter mean diameter ($D_{3,2}$). The results showed that increasing the solids concentration promoted an increase in $D_{3,2}$ for both furthers up to 30% solids. CADM 24-350 exhibited greater sensitivity to solids concentration, as evidenced by the more pronounced

increase in $D_{3,2}$ (from 0.61 to 1.02 mm) and the broader bubble size distribution. In contrast, Senfroth 100 showed a more stable behavior, with most bubbles remaining within the 0.25-0.50 mm size range throughout the evaluated conditions. At 40% solids, a reduction in $D_{3,2}$ was observed for both frothers.

Keywords: Bubble size; three-phase system; image analysis; solids concentration; bubble size distribution; frother.

1. INTRODUÇÃO

A flotação é um dos principais processos empregados na concentração de minérios, sendo amplamente utilizada para promover a separação de partículas com diferentes propriedades de superfície. O processo baseia-se na interação entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar, que transportam essas partículas para a espuma, enquanto as partículas hidrofílicas permanecem na polpa e são removidas como rejeito (ATA et al., 2004; SANTANA et al., 2008). A eficiência dessa separação depende principalmente do sucesso da interação entre a partícula e a bolha, dividida em três etapas essenciais: a colisão, a adesão e a estabilidade do agregado partícula-bolha (BASAROVÁ; HUBICKA, 2014; CHENG et al., 2017; XING et al., 2017).

Essa interação é influenciada por fatores físicos e químicos. O tamanho das bolhas e das partículas determina a chance de colisão, enquanto a adição de reagentes modifica a superfície do mineral para garantir a sua adesão à bolha (ESKANLOU et al., 2018). Paralelamente, a formação e o tamanho das bolhas são controlados por variáveis como a entrada de ar, a velocidade de agitação, a dosagem de espumante e as características da própria polpa (CHO; LASKOWSKI, 2002).

Nesse contexto, a porcentagem de sólidos na polpa desempenha um papel fundamental, pois altera a viscosidade, a densidade e a turbulência do meio, afetando diretamente os mecanismos de quebra e de coalescência das bolhas e, conseqüentemente, a distribuição do tamanho de bolhas. Embora diversos estudos tenham investigado os fatores que afetam a DTB, a influência da porcentagem de sólidos em células mecânicas de flotação, ainda permanece pouco explorada na literatura (ZHANG; FINCH, 2014).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da porcentagem de sólidos na distribuição do tamanho de bolhas (DTB) em um sistema trifásico de flotação, utilizando técnicas de análise de imagens para determinar o diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) e comparar o desempenho dos espumantes CADM 24-350 e Senfroth 100.

3. METODOLOGIA

3.1 Amostras e Reagentes

Para a realização deste estudo, foi utilizado um rejeito *rougher* + *scavenger* proveniente de uma planta de beneficiamento de minério de cobre. A amostra foi caracterizada por difração de raios X (DRX), análise granulométrica e picnometria. Nos ensaios de flotação, foram usados os espumantes CADM 24-350 (1%) e Senfroth 100 (1%), além do coletor PAX (1%). O pH da polpa foi ajustado para 10,5 por meio da adição de uma solução de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) a 5%.

3.2 Teste de Flotação

Os ensaios foram conduzidos em uma célula de flotação mecânica Magotteaux, modelo FM001, pertencente ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Inicialmente, a polpa foi condicionada por 3 minutos com o coletor PAX, na dosagem de 25 g/t, e com o espumante, na dosagem de 20 mg/L. Em seguida, o pH foi ajustado para 10,5 por meio da adição de uma solução de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Em todos os ensaios, as condições operacionais foram mantidas constantes, adotando-se rotação do impelidor de 800 rpm, vazão de ar de 5 L/min e dosagens

fixas dos reagentes. As variáveis experimentais avaliadas foram o espumante utilizado (CADM 24-350 e Senfroth 100) e a porcentagem de sólidos da polpa (0, 10, 20, 30 e 40%). Após a estabilização do sistema, foram adquiridas imagens das bolhas para posterior determinação da distribuição do tamanho de bolhas (DTB) e do diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$).

3.3 Captura e Análise das Imagens

A aquisição das imagens das bolhas foi realizada utilizando o equipamento Anglo Platinum Bubble Sizer (APBS), desenvolvido pela Stone Three Mining (África do Sul), acoplado a uma câmera digital Canon PowerShot S95. Para cada condição experimental, foram obtidas, no mínimo, três imagens, posteriormente processadas e analisadas no software APBS (Bubble Sizer), que permite a identificação e a medição do diâmetro das bolhas.

A distribuição do tamanho de bolhas (DTB) foi avaliada por meio da análise das imagens obtidas, sendo o diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) adotado como parâmetro representativo da distribuição, conforme a Equação 1, em que n representa o número total de bolhas, i corresponde à i -ésima classe de diâmetro, n_i é o número de bolhas com diâmetro D_i e D_i representa o diâmetro da respectiva classe.

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição do tamanho de bolhas em função da porcentagem de sólidos (0 - 40%) para os espumantes CADM 24-350 (a) e Senfroth 100 (b), ambos na concentração de 20 mg/L. Observam-se comportamentos distintos entre os espumantes à medida que a porcentagem de sólidos aumenta. Para o CADM 24-350 (Figura 1.a), as distribuições obtidas em 0% e 10% de sólidos apresentaram elevada concentração de bolhas na faixa de 0,25-0,353 mm, correspondendo a aproximadamente 39% e 36% da frequência relativa, respectivamente. Contudo, a partir de 20% de sólidos, o pico de frequência deslocou-se para a faixa de 0,5 a 0,707 mm e atingiu aproximadamente 31%, evidenciando um alargamento da distribuição. Além disso, nas condições de 30% e 40% de sólidos observou-se maior ocorrência de bolhas com diâmetros superiores a 1 mm, indicando o surgimento de uma distribuição mais heterogênea. Em contraste, o Senfroth 100 (Figura 1.b) apresentou menor sensibilidade ao aumento da porcentagem de sólidos. Embora, em sistema bifásico (0%), sua distribuição tenha sido ligeiramente mais ampla quando comparada à do CADM 24-350, para todas as condições avaliadas, a maior parte das bolhas permaneceu concentrada entre 0,25 e 0,50 mm, não sendo observado aumento expressivo da frequência de bolhas com diâmetro superior a 1 mm, mesmo na condição de 40% de sólidos. Esses resultados indicam que o Senfroth 100 manteve uma distribuição mais estável ao longo das diferentes condições experimentais.

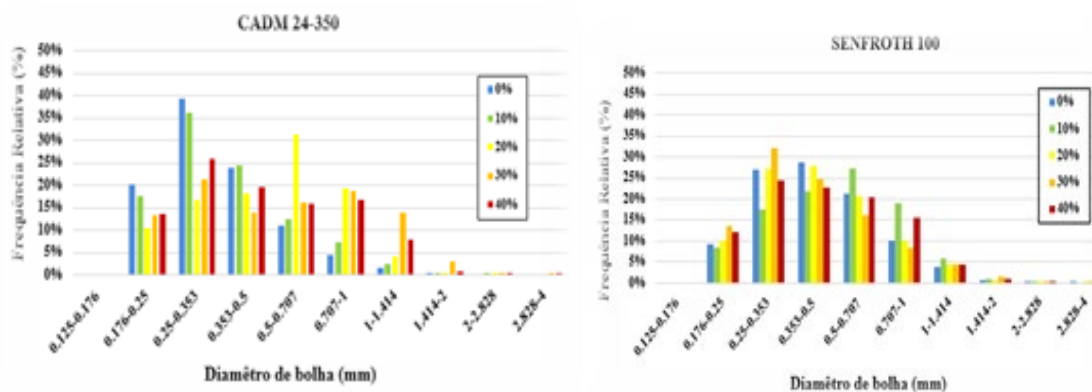


Figura 1: Distribuição de tamanho de bolha sob diferentes porcentagens de sólidos(m/m%) para 20 mg/L dos espumantes CADM 24-350 (a) e do Senfroth 100 (b).

Segundo Kuan e Finch (2010) e Vazirizadeh et al. (2016), a presença de partículas minerais pode favorecer a coalescência das bolhas por meio da adsorção de moléculas de espumante sobre a superfície dos sólidos, reduzindo a concentração de reagente disponível na interface gás-líquido. Além disso, a presença das partículas pode favorecer a formação de pontes entre bolhas, intensificando os mecanismos de coalescência. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram os mecanismos descritos na literatura, evidenciando que o aumento da porcentagem de sólidos influencia a distribuição do tamanho de bolhas, sendo esse efeito mais pronunciado para o espumante CADM 24-350.

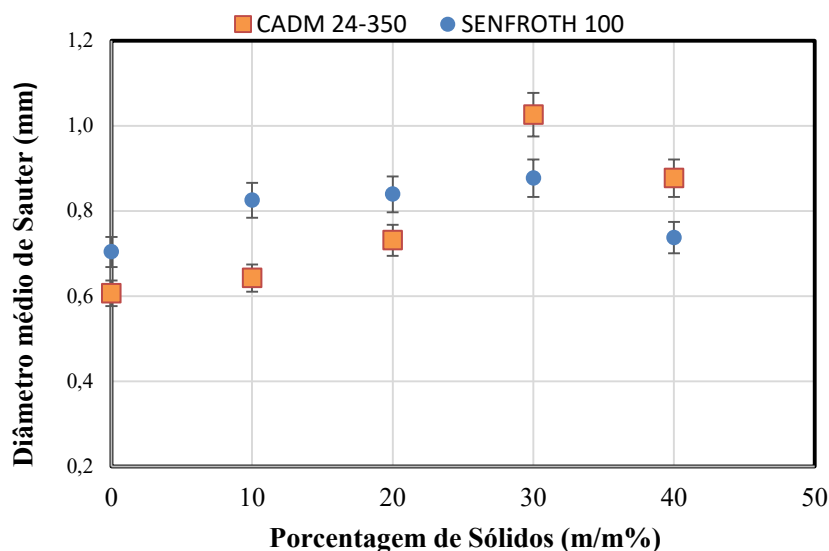


Figura 2: Diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) em função da concentração de sólidos para os espumantes CADM 24-350 e Senfroth 100.

A Figura 2 apresenta a variação do diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) em função da porcentagem de sólidos para os dois reagentes. Para ambos os espumantes, observou-se a elevação do $D_{3,2}$ com o aumento da porcentagem de sólidos até 30%, indicando a formação de bolhas de maior diâmetro. O CADM 24-350 apresentou a maior variação, com aumento de aproximadamente 0,61 para 1,02 mm, enquanto o Senfroth 100 exibiu um aumento mais moderado, variando de 0,70 para 0,88 mm, corroborando as tendências observadas na Figura 1. Na condição de 40%, verificou-se redução do $D_{3,2}$ para ambos os espumantes (0,88 mm para o CADM 24-350 e 0,73 mm para o Senfroth 100). Esse comportamento pode estar relacionado às alterações hidrodinâmicas do sistema em elevadas porcentagem de sólidos, que afetam simultaneamente os mecanismos de coalescência e quebra de bolhas.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a influência da porcentagem de sólidos sobre a distribuição do tamanho de bolhas em um sistema trifásico de flotação utilizando os espumantes CADM 24-350 e Senfroth 100. Os resultados demonstraram que o aumento da porcentagem de sólidos promoveu a elevação do diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) para ambos os espumantes até a condição de 30%. O CADM 24-350 apresentou maior sensibilidade ao aumento da porcentagem de sólidos, evidenciada pelo acréscimo mais acentuado do $D_{3,2}$ (0,61 para 1,02 mm) e pelo alargamento da distribuição do tamanho de bolhas (0,176 a 4 mm). Em contrapartida, o Senfroth 100 mostrou uma distribuição mais homogênea (entre 0,25 e 0,50 mm) e menor variação do $D_{3,2}$ ao longo das condições avaliadas (0,70 para 0,82 mm), indicando maior estabilidade frente ao aumento da porcentagem de sólidos. Na condição de 40%, observou-se uma redução do $D_{3,2}$ para ambos os espumantes, sugerindo que, em elevadas concentrações de sólidos, alterações nas condições hidrodinâmicas da polpa podem influenciar simultaneamente os mecanismos de coalescência e quebra de bolhas.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr. Hudson J.B. Couto, ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, ao Dr. Elves Matiole e todo a equipe do CETEM pelo apoio e ao CETEM pela infraestrutura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATA, S.; AHMED, N.; JAMESON, G. J. The effect of hydrophobicity on the drainage of gangue minerals in flotation froths. *Minerals Engineering*, Oxford, v. 17, n. 7-8, p. 897-901, 2004. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.04.005.

BASAŘOVÁ, P.; HUBIČKA, M. The collision efficiency of small bubbles with large particles. *Minerals Engineering*, Oxford, v. 66, p. 230-233, 2014. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.06.006.

CHENG, G.; SHI, C.; YAN, X.; ZHANG, Z.; XU, H.; LU, Y. A study of bubble-particle interactions in a column flotation process. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Wrocław, v. 53, n. 1, p. 18-30, 2017. DOI: 10.5277/ppmp170102.

CHO, Y. S.; LASKOWSKI, J. S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. *International Journal of Mineral Processing*, Amsterdam, v. 64, n. 2-3, p. 69-80, 2002. DOI: 10.1016/S0301-7516(01)00064-3.

ESKANLOU, A.; KHALESİ, M. R.; ABDOLLAHY, M. Bubble loading profiles in a flotation column. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Wrocław, v. 54, n. 2, p. 355-362, 2018. DOI: 10.5277/ppmp1819.

KUAN, S. H.; FINCH, J. A. Impact of talc on pulp and froth properties in F150 and 1-pentanol frother systems. *Minerals Engineering*, Oxford, v. 23, n. 12, p. 1003-1009, 2010.

SANTANA, R. C.; FARNESE, A. C.; FORTES, M. C.; ATAÍDE, C. H.; BARROZO, M. A. S. Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation. *Separation and Purification Technology*, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 8-15, 2008. DOI: 10.1016/j.seppur.2008.09.004.

XING, Y.; GUI, X.; CAO, Y. Effect of bubble size on bubble-particle attachment and film drainage kinetics: A theoretical study. *Powder Technology*, Lausanne, v. 322, p. 140-146, 2017. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.09.007.

ZHANG, W.; FINCH, J. A. Effect of solids on pulp and froth properties in flotation. *Journal of Central South University*, Changsha, v. 21, n. 4, p. 1461-1469, 2014. DOI: 10.1007/s11771-014-2086-1.