



AVALIAÇÃO DO TAMANHO DE BOLHA EM SISTEMA TRIFÁSICO DE UMA CÉLULA DE FLOTAÇÃO MAGOTTEAUX

ALMEIDA, R.N.¹, ALVES, J.L.S.², BARRETO, E.G.C.³, COUTO, H.J.B.^{1,4}

¹Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. e-mail: rnigri@cetem.gov.br

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio.

³Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

⁴Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ. e-mail: hudson.couto@ifrj.edu.br

RESUMO

A determinação e o controle do tamanho de bolhas são parâmetros relevantes de se obter no processo de flotação, sendo grande parte das pesquisas voltadas na estipulação do tamanho da bolha em sistema bifásico (água e ar). Existem poucos estudos encontrados na literatura em sistema trifásico (água, ar e minério) devido a sua complexibilidade da medição e a falta de métodos para determiná-la. Os espumantes têm um papel significativo no controle de bolhas e estabilização da espuma. Desta forma, este trabalho teve como objetivo apresentar estudos da determinação do tamanho médio e da distribuição de tamanho de bolhas (DTB) em sistema bifásico e sistema trifásico em uma célula de flotação *Magotteaux*. O equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) foi utilizado para visualização e captura das bolhas e o *software* utilizado para o processamento de imagens foi o ImageJ. As concentrações dos espumantes Flotanol D14 e Aerofroth 65 e a porcentagem de sólidos foram as variáveis de processo de flotação avaliadas neste estudo.

PALAVRAS-CHAVE: célula *Magotteaux*, tamanho de bolha, sistema trifásico, espumante.

ABSTRACT

The determination and the control of average size are measures that play important roles on flotation process, with large investigations of bubble size in the two-phase (water and air). Few studies were found in the literature in three-phase systems (water, air and ore) due to their complexity in measurement and lack of methods to determine it. The Frothers have an important role in bubble control and foam stabilization. Thus, this work has as objective show a study on the average size and the bubble size distribution (BSD) in a two-phase system and three-phase system in a *Magotteaux* flotation cell. The equipment *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) was used to view and capture the bubbles and the software used for image processing was ImageJ. The concentration of Flotanol D14 and Aerofroth 65 and the percentage of solids were the variables of the flotation process evaluated in this study.

KEYWORDS: *Magotteaux* cell, bubble size, three-phase system, frother.

1. INTRODUÇÃO

Diversos autores mencionam a importância de determinar o tamanho de bolhas em células de flotação, sendo a maior parte destas pesquisas focadas na determinação do tamanho da bolha em sistema bifásico (água e ar). Existem poucos trabalhos reportados na literatura em sistema trifásico (água, ar e minério) relacionado a sua complexibilidade da medição e a falta de métodos para determiná-la. Grau e Heiskanen (2005), Kuan e Finch (2009), Tucker et al. (1994) e Vazirizadeh et al. (2016) estudaram a influência de variáveis físicas e químicas no tamanho da bolha em uma célula de flotação utilizando diferentes espumantes comerciais para um sistema trifásico.

Os espumantes têm um grande impacto no tamanho de bolhas, sendo utilizados na flotação visando melhorar a dispersão do ar em bolhas finas e para estabilização da espuma. Eles se acumulam preferencialmente na interface água/ar e interagem com moléculas coletoras adsorvidas em partículas sólidas na colisão partícula/bolha. O resultado mais importante dos espumantes na flotação vem do seu efeito no tamanho da bolha. Verificou que o impacto dos espumantes no tamanho de bolha resulta da sua eficácia de evitar a coalescência das bolhas. Com o aumento da concentração do espumante o grau de coalescência diminui e em uma determinada concentração (concentração crítica de coalescência – CCC) a coalescência das bolhas é totalmente evitada. (Grau et al., 2005).

Existem vários métodos descritos pelos autores para determinação do tamanho de bolhas, tais como: a utilização de correlações fluidodinâmicas, medidas de eletro resistividade, difração laser, análise de imagem, dentre outras (Couto et al., 2009; Grau e Heiskanen, 2005; Grau et al., 2005; Rodrigues, 2003). Entre esses métodos destacam-se aqueles com base na captura e processamento de imagens digitais utilizando visores externos, apresentando-se como uma alternativa promissora para avaliação do tamanho de bolhas em células de flotação industriais.

Este estudo tem como propósito verificar a influência da presença do minério sobre o tamanho médio e a distribuição do tamanho de bolhas (DTB) geradas em uma célula mecânica de flotação *Magotteaux*, utilizando a de análise de imagem (equipamento *Bubble Sizer*) de obtenção de imagens digitais. Será avaliado também o comportamento de diferentes espumantes utilizados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Reagentes

Para os estudos de determinação do diâmetro de bolhas foram empregados dois reagentes espumantes: Flotanol D14 (um polipropileno glicol metil éter, fornecido pela Clariant) e o Aerofroth 65 (um polipropileno glicol, fornecido pela Cytec). Foram utilizadas soluções destes reagentes entre 2-50 mg/L.

Para os ensaios de flotação foram utilizados como depressor o $ZnSO_4$ e o $Na_2S_2O_5$, como coletor o FloMin C3330 (um isopropil xantato de sódio) e para regulação de pH foi utilizada a solução de $Ca(OH)_2$.

2.2. Amostra

Foram utilizadas amostras de um minério sulfetado com depósito localizado em Caçapava do Sul, com cerca de 1,9% de Pb e 1,4% de Zn, composto principalmente por galena e esfarelita. O minério foi homogeneizado, quarteado, armazenado em alíquotas de 3 kg e separado para a etapa de britagem. A moagem da amostra foi realizada em um moinho de barras, conduzida até um P_{80} de 125 μm .

2.3. Célula de Flotação

Os testes foram feitos em uma célula de flotação *Magotteaux* modelo FM001. Foram mantidas constantes a velocidade da rotação mecânica, a vazão de ar e a pressão, variando a concentração, tipo de espumante utilizado e a porcentagem de sólidos (%). Os parâmetros operacionais estão detalhados na Tabela 1 e os parâmetros de flotação estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Condições operacionais dos ensaios na célula mecânica de flotação *Magotteaux*.

Parâmetros	Condições Operacionais	
	CUBA 1,5L	CUBA 5,0L
Rotação mecânica	800 rpm	1000 rpm
Vazão de ar	3 L/min	3 L/min
Pressão	10 psi	15 psi
Concentração do espumante	2-50 mg/L	2-50 mg/L
% sólidos	0 - 40%	0 - 30%

Tabela 2. Parâmetros da flotação de galena (PbS) utilizados nos ensaios.

Reagentes	ZnSO ₄	Na ₂ S ₂ O ₅	C3330	Espumante
Concentração da solução	10%	10%	0,2%	1%
Dosagem de reagente (g/t)	300	400	7	3-67
Tempo de condicionamento (min)	3	3	2	2
pH	8,5	8,5	8,5	8,5

A *Stone Three Mining* (África do Sul) comercializa o equipamento *Anglo Platinum Bubble Sizer* (APBS) desenvolvido para visualização e captura de bolhas.

As imagens das bolhas foram processadas por meio do *software ImageJ* (versão 1.48s, de domínio público). Este é um *software* aberto, que pode ser acessado de forma gratuita pelo site <https://imagej.nih.gov/ij/>, possuindo vários domínios para melhorar a definição e calibração das imagens, além de ter como principal benefício a facilidade de visualizar em tempo real a resposta de diversas técnicas de tratamento de imagens, por uma interface gráfica (Almeida et al., 2017; Almeida e Couto, 2018). Foram adotados os seguintes passos: 8-bit (conversão para tons de cinza); *Bandpass filter* (filtro); *threshold* (limiarização); *fill holes* (preenchimento das bolhas definidas); *watershed* (segmentação); identificação e análise das imagens.

Com base no processamento das imagens foi empregado como cálculo do diâmetro médio, o diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$), definido pela Equação 1, onde d_b e n são o diâmetro de bolha e o número de bolhas para classe de tamanho “i”, respectivamente.

$$D_{3,2} = \frac{\sum n_i \cdot d_{bi}^3}{\sum n_i \cdot d_{bi}^2} \quad (1)$$

2.4. Determinação da concentração crítica de coalescência (CCC)

A CCC de um espumante refere-se a menor concentração que proporciona o menor diâmetro de bolha, sendo um indicador relevante para confrontar o comportamento de diferentes espumantes de flotação, conforme alguns autores (Cho e Laskowski, 2002; Grau et al., 2005; Gupta et al., 2007). A CCC pode ser determinada tanto graficamente (Grau et al., 2005) como através de ajuste dos dados experimentais ($D_{3,2}$ versus C_f) ao modelo de Laskowski proposto na Equação 2 (Laskowski, 2003). Desta forma é possível obter os parâmetros de diâmetro de bolha limite (d_L), redução de diâmetro (A) e constante de decaimento (B) (Laskowski, 2003; Braga et al., 2015).

$$D_{3,2} = d_L + A \cdot \exp(-B \cdot C_f) \quad (2)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 (a) e (b) apresenta a relação do $D_{3,2}$ para diferentes concentrações dos espumantes Aero 65 e Flotanol D14 (2,0 até 50 mg/L), respectivamente. Com a finalidade de confrontação, os testes foram realizados em sistema bifásico e sistema trifásico. Os resultados mostraram que com o aumento da concentração do espumante, o diâmetro das bolhas diminui e, conseqüentemente, eleva o número de bolhas, devido à redução do efeito de coalescência, até alcançar a estabilização, assim como demonstrado em diversos estudos já publicados na literatura (Almeida et al., 2017; Almeida e Couto, 2018; Cho e Laskowski, 2002; Couto et al., 2009; Grau et al., 2005; Gupta et al., 2007; Veras et al., 2014).

Comparando os resultados obtidos nos sistemas bifásico e trifásico, é possível verificar que houve um pequeno acréscimo no tamanho de bolhas com a adição do minério de Pb/Zn para os dois surfactantes utilizados. Esse efeito similar da influência do minério sobre o $D_{3,2}$ foi reportado por outros autores (Grau e Heiskanen, Kuan e Finch, 2010; Tucker et al., 1994; Vazirzadeh et al., 2016).

A Tabela 3 apresenta os resultados experimentais da CCC e do diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) após a estabilização (depois da CCC), e os parâmetros do modelo de Laskowski (Eq. 2).

De acordo com os dados da CCC e do $D_{3,2}$ apresentados na Tabela 3, observa-se que houve um acréscimo considerável da CCC com a adição do minério utilizando o espumante Aero 65, com valores de 5 mg/L para o sistema bifásico e 11 mg/L para o sistema trifásico. Já para o espumante Flotanol D14 não houve uma variação significativa da CCC, sendo este

valor próximo de 7 mg/L. Os dois espumantes utilizados (Aero 65 e Flotanol D14) apresentaram valores próximos da CCC e do $D_{3,2}$, demonstrando que ambos os espumantes apresentam um desempenho satisfatório, pois alcançam o diâmetro mínimo de bolhas em baixas concentrações de surfactante.

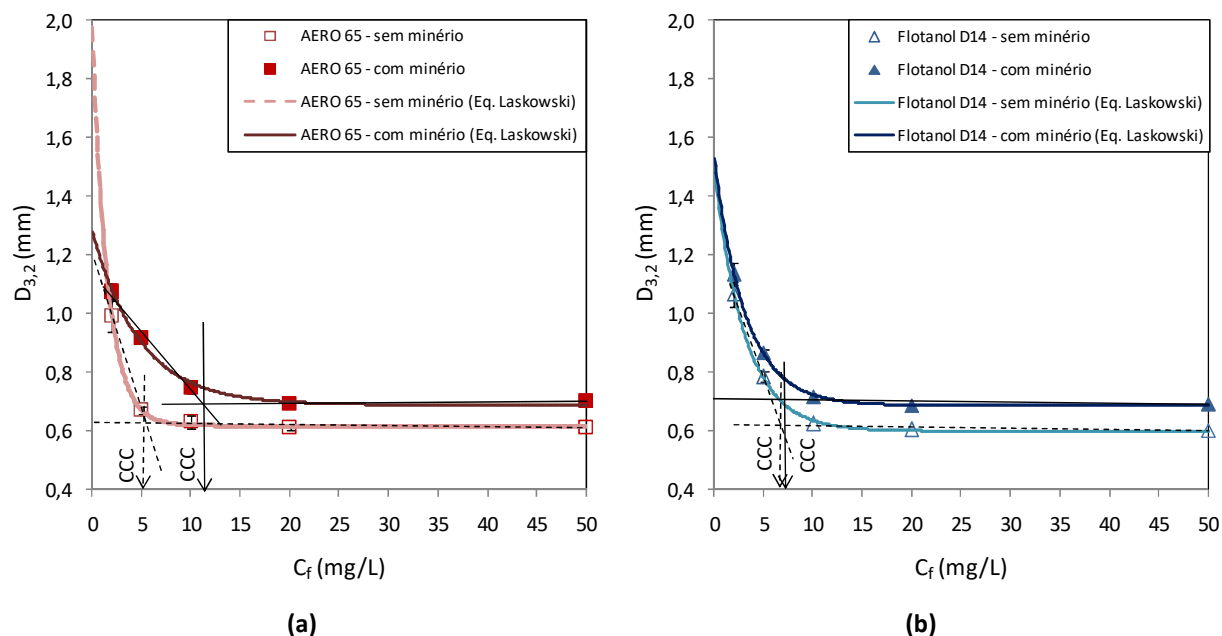


Figura 1. Influência das concentrações dos espumantes Aero 65 (a) e do Flotanol D14 (b) sobre o diâmetro médio de Sauter. Cuba 5L. %s=25%.

Com a utilização do *software* Statistica, versão 13.1, foram estimados os parâmetros do modelo de Laskowski (Eq. 2). Os valores de d_L alcançados pela Equação 2 ficaram muito próximos aos valores do $D_{3,2}$ acima da CCC que foram calculados pela Equação 1, mostrando ser uma boa opção para determinação da CCC do espumante. Os dados obtidos pelo modelo de Laskowski encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. CCC, $D_{3,2}$ e Parâmetros de Laskowski para os espumantes estudados.

Espumantes	CCC (mg/L)	$D_{3,2}$ (mm)	Diâmetro de bolha limite (d_L)	Redução de diâmetro (A)	Constante de decaimento (B)
Aero 65 – sem minério	5	0,61	0,6192	1,3592	0,6475
Aero 65 – com minério	11	0,70	0,6901	0,5908	0,2055
Flotanol D14 – sem minério	7	0,61	0,6011	0,8881	0,3210
Flotanol D14 – com minério	7	0,69	0,6883	0,8399	0,3140

As Figuras 2 e 3 mostram respectivamente os histogramas da DTB para diferentes concentrações dos espumantes Aero 65 e Flotanol D14 (2 até 50 mg/L) para os sistemas bifásico (a) e trifásico (b). É possível verificar um comportamento similar da DTB comparando os dois surfactantes utilizados. Analisando separadamente o comportamento para o Aero 65 no sistema bifásico, pode-se notar que na concentração de 2 mg/L houve uma ampla distribuição das bolhas entre a faixa de diâmetro de 0,55 a 1,74 mm. A partir da concentração de 5 mg/L é possível verificar uma similaridade com as concentrações

superiores, encontrando bolhas na faixa entre 0,55 a 1,14 mm, com maior predominância de bolhas na faixa entre 0,55 a 0,84 mm. Já para o Flotanol D14, para as concentrações de 2 e 5 mg/L, foi observado uma diversidade de bolhas entre as regiões de 0,55 a 1,74 mm. Já para o sistema trifásico é possível observar uma maior estabilização das bolhas a partir da concentração de 10 mg/L, havendo bolhas na faixa de 0,55 a 1,14 mm, com maior porcentagem de bolhas também ocorrendo na região com valores entre 0,55 a 0,84 mm. Esse resultado está de acordo com o apresentado anteriormente na Figura 1 (a) e (b), onde a CCC para o Aero 65 encontra-se próximo a 5 mg/L para o sistema bifásico e próximo a 10 mg/L para o sistema trifásico, e para o Flotanol D14 a CCC encontra-se próximo de 10mg/L para ambos os sistemas, bifásico e trifásico.

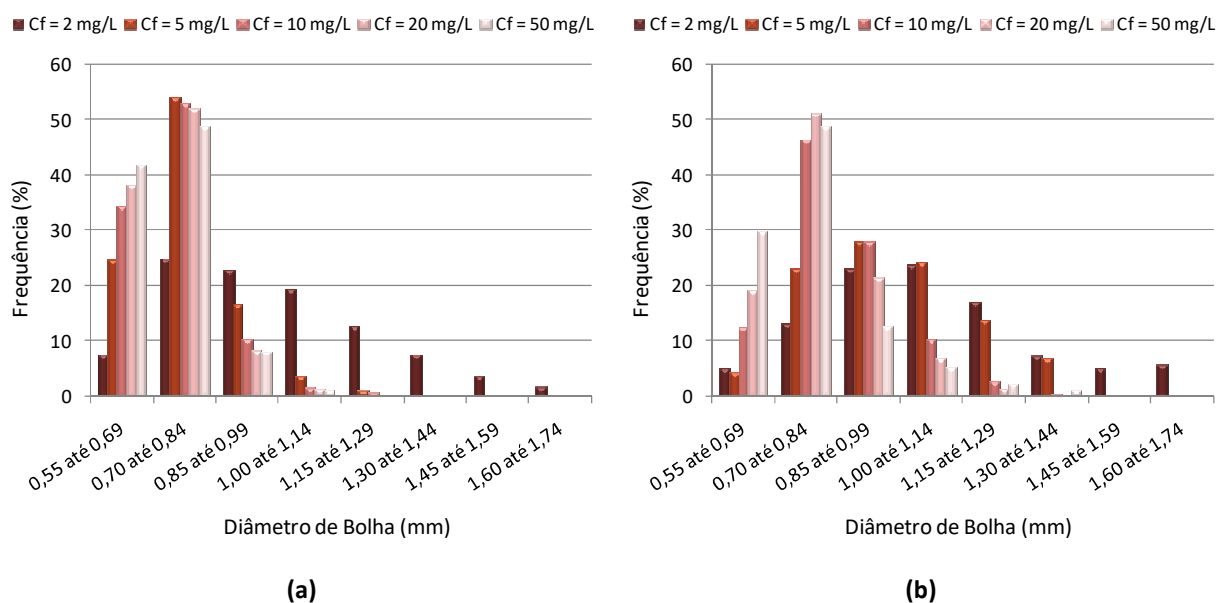


Figura 2. DTB do espumante Aero 65 ($C_f = 2-50$ mg/L) para os sistemas bifásico (a) e trifásico ($\%s = 25\%$) (b). Cuba 5L.

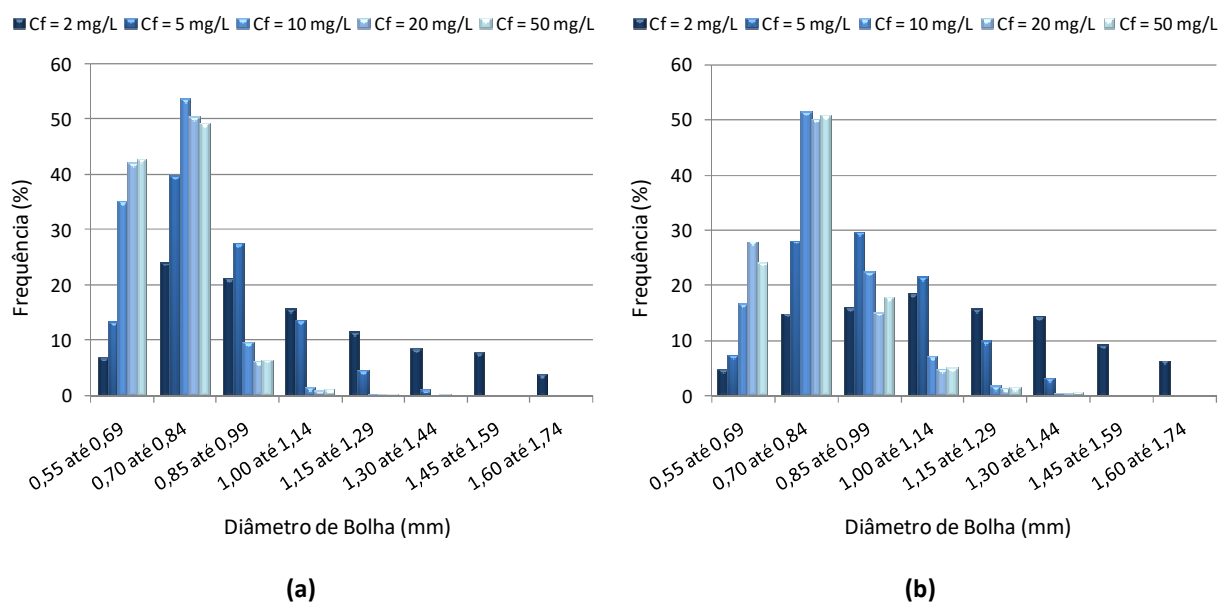


Figura 3. DTB Flotanol D14 ($C_f = 2-50$ mg/L) para os sistemas bifásico (a) e trifásico ($\%s = 25\%$) (b). Cuba 5L.

Ao estudar o efeito da presença de sólidos no tamanho de bolhas Kuan e Finch (2010) e Vazirzadeh et al., (2016) concluíram que esse efeito do aumento do tamanho de bolhas no sistema trifásico pode estar associado a interações superficiais, sendo explicado pela coalescência promovida pelo efeito da ponte bolha-partícula-bolha (partícula fortemente hidrofóbica) e a adsorção do espumante na superfície do sólido.

Os resultados do efeito da porcentagem de sólidos (%) sobre o tamanho de bolha estão indicados na Figura 4. Foi mantido estável a concentração do espumante Flotanol D14 em 20 mg/L (acima da CCC). De acordo com o resultado apresentado observa-se que não existiu uma mudança significativa do $D_{3,2}$ com o aumento da porcentagem de sólidos, apenas um pequeno aumento que pode ser desconsiderado levando-se em conta as barras de erros apresentadas. Esse efeito pode ser justificado pelo fato do valor utilizado da concentração do Flotanol D14 ser acima da CCC, tornando o valor final do $D_{3,2}$ menos sensível a variação da %s. Para o cálculo do erro experimental foi considerado duas vezes o valor do desvio padrão, para 95% de confiança, com experimentos sendo realizados em triplicata.

De acordo com a Figura 5 é possível verificar o efeito do $D_{3,2}$ sobre diversas faixas granulométricas, mantendo constante a concentração do espumante Flotanol D14 em 20 mg/L (acima da CCC) e a porcentagem de sólidos em 10%. Nota-se que de fato não ocorreu uma variação significativa nos valores do $D_{3,2}$ para faixas granulométricas distintas, enfatizando o comentário anterior, que para valores de concentração acima da CCC não há alteração considerável no $D_{3,2}$.

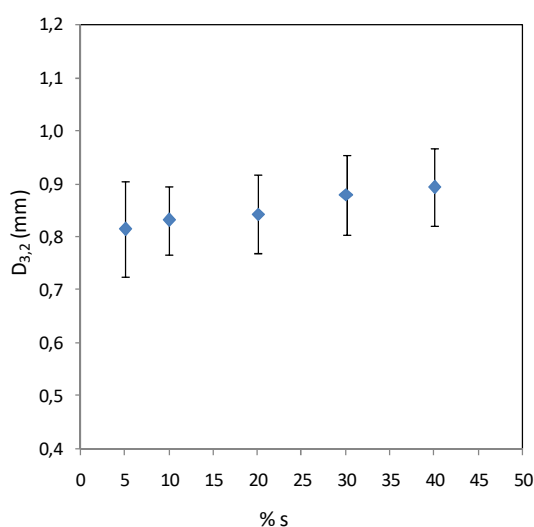


Figura 4. Efeito da %s sobre o $D_{3,2}$. $C_f=20\text{mg/L}$ (Flotanol D14). Cuba 1,5L.

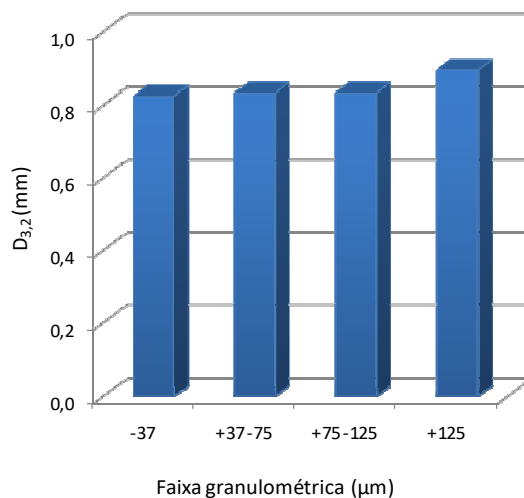


Figura 5. Variação do $D_{3,2}$ para diferentes faixas granulométricas. $C_f=20\text{mg/L}$ (Flotanol D14). %s=10%. Cuba 1,5L.

4. CONCLUSÕES

Com o estudo mostrado foi possível analisar a influência dos espumantes Aerofroth 65 e Flotanol D14 sobre o tamanho de bolhas para um sistema trifásico e compará-lo com um sistema bifásico. Os resultados alcançados mostraram que na presença de ambos os espumantes houve um pequeno acréscimo no tamanho de bolhas na presença de minério.

Os dois espumantes utilizados apresentaram um resultado satisfatório, já que alcançam o diâmetro mínimo de bolhas, entre 0,6 e 0,7 mm, utilizando baixas concentrações de espumante, abaixo de 10 mg/L. A equação de Laskowski mostrou-se eficaz para determinação da CCC dos espumantes.

Não foi observada uma variação significativa no diâmetro de bolhas para diferentes porcentagem de sólidos e para faixas granulométricas distintas, utilizando concentração de espumante Flotanol D14 acima da CCC.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer á Cytec Solvay Group pelo fornecimento dos espumantes, ao CNPq pelo financiamento das bolsas de estudo do Estevão e da Renata e ao CETEM/MCTIC pelo estágio do João e pela infraestrutura.

6. REFERÊNCIAS

Almeida RN, Barreto EGC, Gomes OFM, Couto HJB. Avaliação do Tamanho de Bolhas em uma Coluna de Flotação. In: XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017, Belém, Brasil.

Almeida RN, Couto HJB. Estudo de distribuição de tamanhos de bolhas em células de flotação. In: VII Jornada do Programa de Capacitação Institucional, 2018, Rio de Janeiro, Brasil.

Braga AS, Souza Pinto TC, Matai PHL, Leal Filho LS. Concentração micelar crítica e concentração crítica de coalescência de reagentes de flotação. *Holos* 2015; 7; 140-147.

Cho YS, Laskowski JS. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. *International Journal of Mineral Processing* 2002; 64: 69-80.

Couto HJB, Nunes DG, Neumann R, França SCA. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. *Minerals Engineering* 2009; 22: 330-335.

Grau RA, Heiskanen, K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells. *Minerals Engineering* 2005; 18; 1164–1172.

Grau RA, Laskowski JS, Heiskanen K. Effect of frothers on bubble size. *International Journal of Mineral Processing* 2005; 76: 225-233.

Gupta AK, Banerjee PK, 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* 2007; 82: 126-137.

Kuan SH, Finch J A. Impact of talc on pulp and froth properties in F150 and 1-pentanol frother systems. *Minerals Engineering* 2009; 23: 1003–1009.

Laskowski JS. Fundamental properties of flotation frothers. In: Lorenzen L, Bradshaw DJ. *Proceedings 22nd Int. Mineral Processing Congress*. Cape Town; 2003. p. 788-797.

Rodrigues RT, Rubio J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. *Minerals Engineering*. 2003; 16: 757-765.

Tucker JP, Deglon DA, Franzidis JP, Harris MC, O'Connor CT. An evaluation of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell. *Minerals Engineering* 1994; 7; 667-680.

Vazirizadeh A, Bouchard J, Chen Y. Effect of particles on bubble size distribution and gas hold-up in column flotation. *International Journal of Mineral Processing* 2016; 57; 163-173.

Veras MM, Baltar CAN, Paulo JBA, Leite, JYP. Comparative study of the main flotation frothers using a new HYDROMESS adapted technique. *REM: R. Esc. Minas* 2014; Ouro Preto, 67(1); 87-92.