

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA DISPERSÃO DE BOLHAS EM CÉLULAS DE FLOTAÇÃO

C. Oliveira¹, M.A. Seger¹, R.T. Rodrigues¹

¹Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental, Av. Bento Gonçalves, 9500/75, Porto Alegre, RS, 91509-900. e-mail: rafaél.teixeira@ufrgs.br

RESUMO

A flotação é um processo físico-químico complexo onde inúmeras variáveis influenciam a sua eficiência. O tamanho das bolhas constitui um parâmetro importante no processo de flotação, influenciando, principalmente, a eficiência de coleta das partículas por bolhas e a capacidade de carregamento. A geração e o uso de bolhas de ar geradas por diferentes sistemas de aeração têm sido alvo de diferentes estudos que visam investigações precisas da distribuição de tamanho de bolhas, assim como suas dispersões (espacial) nas células de flotação. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para avaliação da dispersão do gás (bolhas de ar) em células de flotação, através da determinação da distribuição de tamanho de bolhas e da velocidade superficial de gás (J_g). O sistema utiliza o conceito da “captura” das bolhas em um aparato externo, combinando técnicas de captura e análise de imagens digitais. Foram avaliados os parâmetros de dispersão de gás gerados por um sistema difusor de ar MinnovEX. A influência de alguns parâmetros operacionais na geração das bolhas foi estudada e os resultados obtidos mostraram uma boa correspondência com os valores encontrados na literatura. O equipamento permite ainda a coleta das partículas flotadas, possibilitando a avaliação do carregamento das bolhas (bubble load) e, conseqüentemente, a compreensão e melhoria, do ponto de vista teórico e prático, dos processos de flotação, principalmente relacionados à flotação de finos e ultrafinos de minérios.

PALAVRAS-CHAVE: Flotação de minérios, distribuição de tamanho de bolhas, processamento e análise de imagens, dispersão de gás, células de flotação.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e automação de métodos precisos e fidedignos para avaliação da dispersão do gás em equipamentos de flotação são de suma importância para o projeto e desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, bem como para validação de modelagens do processo de flotação desenvolvidos com auxílio da mecânica de fluidos computacional (CFD). A determinação das propriedades das dispersões gás/líquido na flotação inclui, principalmente, medidas de velocidade superficial de gás (J_g), de tamanho de bolhas (normalmente o diâmetro médio de Sauter, d_{Sauter}), de *holdup* de gás (ε_g) e da estimativa do fluxo superficial de bolhas (S_b) (Finch et al., 2000).

A capacidade de aeração de um equipamento de flotação é determinada pela velocidade superficial do gás (J_g), a qual é importante devido sua influência no desempenho do processo, sendo a medida local deste parâmetro, um indicativo de como o ar é disperso na célula de flotação. As medidas do J_g têm sido realizadas principalmente, pela captura do gás em um cilindro graduado (Gorain et al., 1996; Burgess, 1997; Deglon et al., 2000) ou por métodos contínuos que medem a vazão (ou pressão) de gás capturado por um cilindro (Yianatos et al., 2001; Grau e Heiskanen, 2003).

No caso da determinação do tamanho de bolhas em células de flotação, ainda ocorrem desafios para o desenvolvimento de técnicas precisas e triviais. Dentro deste contexto, nos últimos anos, diversas técnicas e aproximações para avaliação do tamanho de bolhas têm sido reportados, entretanto, apenas um número limitado destas tem sido empregados em escala de laboratório e industrial. Dentre os principais exemplos destes casos, pode-se citar o equipamento desenvolvido na University of Cape Town (UCT) que utiliza um método óptico para análise de bolhas succionadas por um tubo capilar (Randall et al., 1989; Tucker et al., 1994; Gorain et al., 1995), bem como os métodos baseados na captura e análise de imagens em visores externos desenvolvidos na Helsinki University of Technology (HUT) (Grau e Heiskanen; 2003) e na McGill University (Hernandez-Aguilar et al.; 2004). Dentre as técnicas propostas, os métodos fotográficos combinados ao processamento de imagens digitais aparecem como soluções promissoras para medições on-line de tamanho de bolhas em células de flotação.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e aplicação de um sistema automatizado para avaliar a distribuição de tamanho de bolhas geradas em um sparger tipo MinnovEX, bem como outros parâmetros de dispersão como, por exemplo, velocidade superficial de gás (J_g pontual) em células de flotação, utilizando soluções de um reagente surfactante em diferentes concentrações.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Equipamento

O sistema de medição foi constituído por uma câmara visualizadora de bolhas de ar com inclinação ajustável confeccionada em alumínio medindo 27 x 16,5 x 11 cm (altura x largura x profundidade). Esta câmara foi conectada a um tubo amostrador de aço inoxidável (27,5 mm de diâmetro interno e 50 cm de comprimento) que pode ser facilmente ajustável para

realizar amostragem em diferentes profundidades na célula. A conexão do tubo amostrador com a câmara visualizadora foi realizada através de uma rótula (60 mm diâmetro), permitindo a permanência deste sempre na direção vertical, independente das diferentes inclinações da câmara visualizadora. A outra extremidade do tubo amostrador foi provida de uma válvula pneumática de passagem plena, especialmente projetada para esta finalidade, permitindo o enchimento da câmara com água (ou solução) e a entrada das bolhas de ar. Ainda, a câmara visualizadora continha uma válvula para entrada de água (para enchimento da mesma) e um tubo vertical auxiliar para saída de ar, onde as bolhas de ar foram conduzidas após passarem pelo visor. O nível dentro da câmara foi mantido constante durante as medidas a partir da aplicação de vácuo no tubo auxiliar e a vazão de ar foi medida em um fluxômetro para determinação do Jg. Adicionalmente, pode ser acoplado a este tubo auxiliar uma derivação para coleta das partículas flotadas, permitindo a avaliação de outros parâmetros, como, por exemplo, o carregamento das bolhas (bubble load).

A Figura 1 apresenta um esquema do sistema experimental. Inicialmente, este fluxograma foi projetado para sistemas bifásicos (ar/água), sendo pretendido a aplicação posterior em sistemas trifásicos ar/água/partículas (ar/polpa).

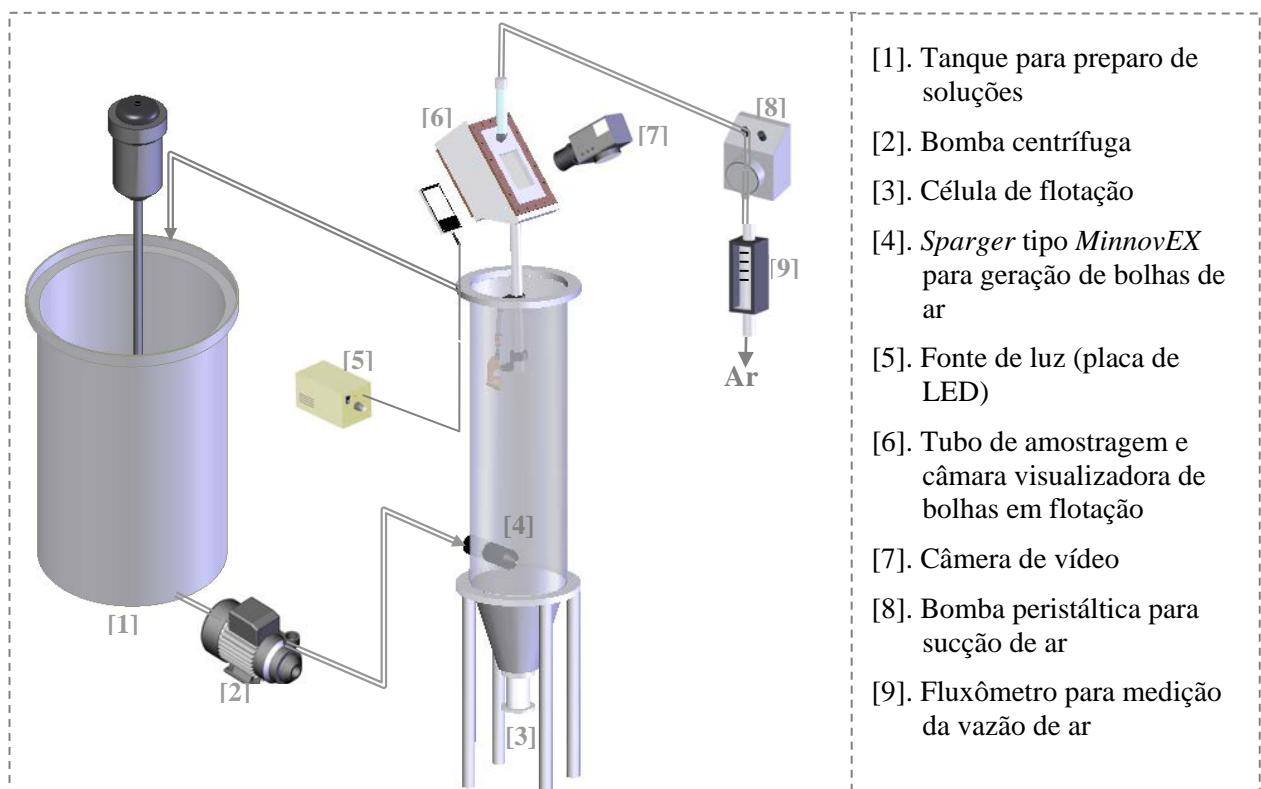


Figura 1. Sistema experimental para determinação do tamanho de bolhas e velocidade superficial de gás.

2.2. Captura, processamento e análise de imagens

A captura, processamento e análise das imagens foram automatizadas com o auxílio do software Matrox Inspector 8, permitindo analisar uma elevada população de bolhas. As imagens foram capturadas com uma câmera filmadora JVC – TK 1280E (NTSC - 768 x 576 pixels), com velocidade de captura (speed shutter) ajustada em 1/500 s, acoplada à uma lente de zoom (MLH-10X Macro Zoom – Moritex Corporation). A câmera foi conectada ao

computador através de uma placa de captura Matrox Meteor-II. que, capturou e analisou, aproximadamente 120 imagens, em intervalos regulares de 2 segundos, para cada condição experimental. A iluminação do sistema foi realizada por uma placa de LED (Chip-mount LED backlight, modelo MDBC-CW100 – marca Moritex) de 10 x 10 cm e fonte (Wave Power Source - MLEK-A230W1LRD, marca Moritex). Assim, a câmara visualizadora foi iluminada por luz transmitida, permitindo a obtenção de imagens com excelente contraste. Desta forma, os raios luminosos foram totalmente refletidos numa interface água-ar, quando o ângulo de incidência (ϕ) excedeu 48,7º. A máxima área fotografada foi de 44,1 cm² (7,67 x 5,75 cm) e a mínima de 3,41 mm² (2,13 x 1,60 cm).

As principais etapas do processamento de imagens, para identificação e análise dos objetos, foram constituídas por etapas de conversão das imagens para tons de cinza (256 tons – 8 bits), limiarização (“threshold”), preenchimento do interior das bolhas (fill holes) e segmentação de objetos agrupados (“watershed”), conforme mostrado na Figura 2.

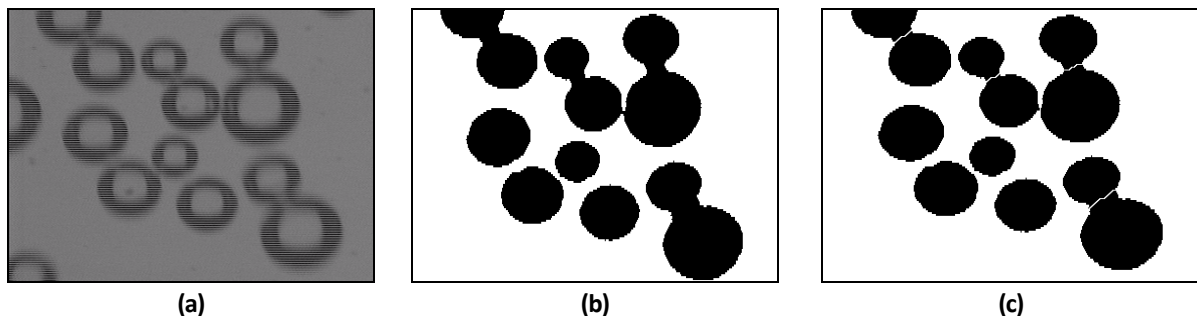


Figura 2. Principais etapas do processamento e análise de imagens. (a) Conversão para tons de cinza (8 bits); (b) Limiarização (threshold) + fill holes; (c) Segmentação (watershed).

O diâmetro característico de bolhas determinado foi o diâmetro médio de Sauter (d_{sauter}), considerado na literatura a representação mais coerente de tamanho médio de bolhas obtidas a partir de diferentes técnicas. Este parâmetro é definido como o diâmetro médio de volume-superfície, e é determinado pela Equação 1.

$$d_{\text{sauter}} = \frac{\sum n_i d_{bi}^3}{\sum n_i d_{bi}^2} \quad (1)$$

onde, os parâmetros d_{bi} e n_i são o diâmetro de bolhas e o número de bolhas, respectivamente.

2.3. Geração de bolhas por ar induzido

Na etapa de geração de bolhas, uma mistura de solução de espumante Dowfroth 250 (comumente utilizado na flotação de minérios) e ar foi injetada em um sparger MinnovEX. A água foi previamente condicionada com o espumante em um tanque de 300 L e bombeada por uma bomba centrífuga através do sparger localizado na base de uma coluna de 27,5 cm de diâmetro e 120 cm de altura. A solução foi recirculada através de uma saída localizada na parte superior da coluna. A vazão de líquido através do sparger (controlada por um fluxômetro, marca Omel, 0 a 3 m³/h) e a pressão da bomba foram mantidas constantes em 1

m³/h e 3 kgf/cm², respectivamente. A pressão e a vazão de ar injetado (20 L/min nas medidas de tamanho de bolhas), foram controladas por um manômetro digital (Druck, modelo DPI 705) e por um fluxômetro (Omel, 0 a 100 L/min), respectivamente. Todos os estudos foram realizados a temperatura ambiente (~ 25 °C) e as medidas de tensão superficial das soluções de espumante foram determinadas com um tensiômetro Nima (modelo DST 9005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra imagens de bolhas de ar geradas em diferentes concentrações de espumante DF-250.

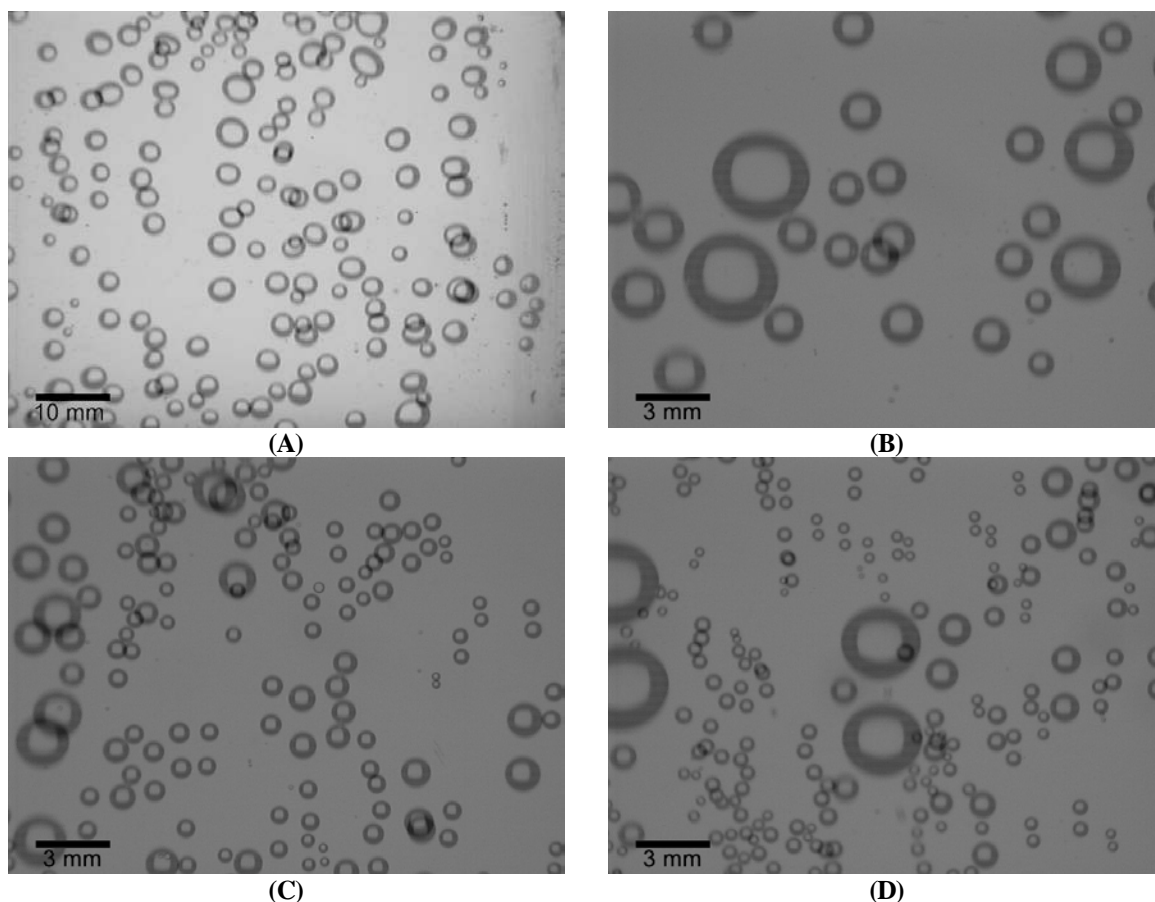


Figura 3. Imagens capturadas pelo sistema de medição de tamanho de bolha para diferentes concentrações de DF-250. Condições experimentais: Vazão de líquido: 1 m³/h, vazão de ar: 20 L/min; [DF-250]: (a) 0 mg/L; (b) 5 mg/L; (c) 10 mg/L; (d) 15 mg/L.

As Figuras 4 e 5 apresentam o efeito da concentração do tensoativo DF 250 no tamanho de bolha. A Tabela I apresenta o efeito da concentração de Dowfroth 250 na tensão superficial líquido/ar. A adição de DF 250 em concentrações de 5 a 10 mg/L ocasiona uma redução significativa no diâmetro das bolhas, embora não diminua consideravelmente a tensão superficial. Na ausência do espumante bolhas grandes ($d_{sauter} = 3,96$ mm) foram formadas enquanto que para concentrações da ordem de 10 mg/L, o tamanho de bolha diminuiu substancialmente ($d_{sauter} = 1,04$ mm). Resultados similares foram constatados por Sweet et al. (1997), que verificaram uma fraca correlação entre o tamanho de bolha e tensão de superficial. Estes resultados parecem estar em contraste com a convicção comum de que a redução do tamanho de bolha provocada pelo aumento da concentração de surfactante deve-se a uma diminuição significativa na tensão superficial (Aldrich e Feng, 2000).

Concentrações de DF 250 superiores a 10 mg/L pouco influenciaram a distribuição de tamanho de bolha (e na tensão superficial), com o diâmetro médio (d_{sauter}) permanecendo praticamente constante em aproximadamente 1 mm. Estes resultados estão de acordo com estudos realizados por Laskowski et al. (2003) e Cho e Laskowski (2002a). Laskowski et al. (2003) determinaram a concentração de coalescência crítica (CCC) para este espumante em cerca de 10 mg/L. Cho e Laskowski (2002a) ao estudar o efeito de espumantes no tamanho de bolhas geradas em *spargers* e células mecânicas concluíram que o tamanho de bolhas

dependia fortemente da concentração de espumante. À baixa concentração de espumante, abaixo da CCC, o tamanho de bolha é muito grande, indicando a coalescência como principal mecanismo. Assim, a coalescência pode ser prevenida com concentrações de espumantes que excedem sua CCC. Segundo Cho e Laskowski (2002b) a dosagem de espumante é importante para avaliação de outros parâmetros operacionais, pois trabalhando-se em concentrações acima da CCC, ou seja, minimizando a coalescência, pode-se avaliar o real efeito de outros parâmetros.

Tabela 1. Efeito da concentração de espumante (DF 250) na tensão superficial (líquido/ar) da água.

Concentração de DF 250 (mg/L)	Tensão Superficial (m/Nm)
0	71,2
5	69,7
10	68,5
15	67,1

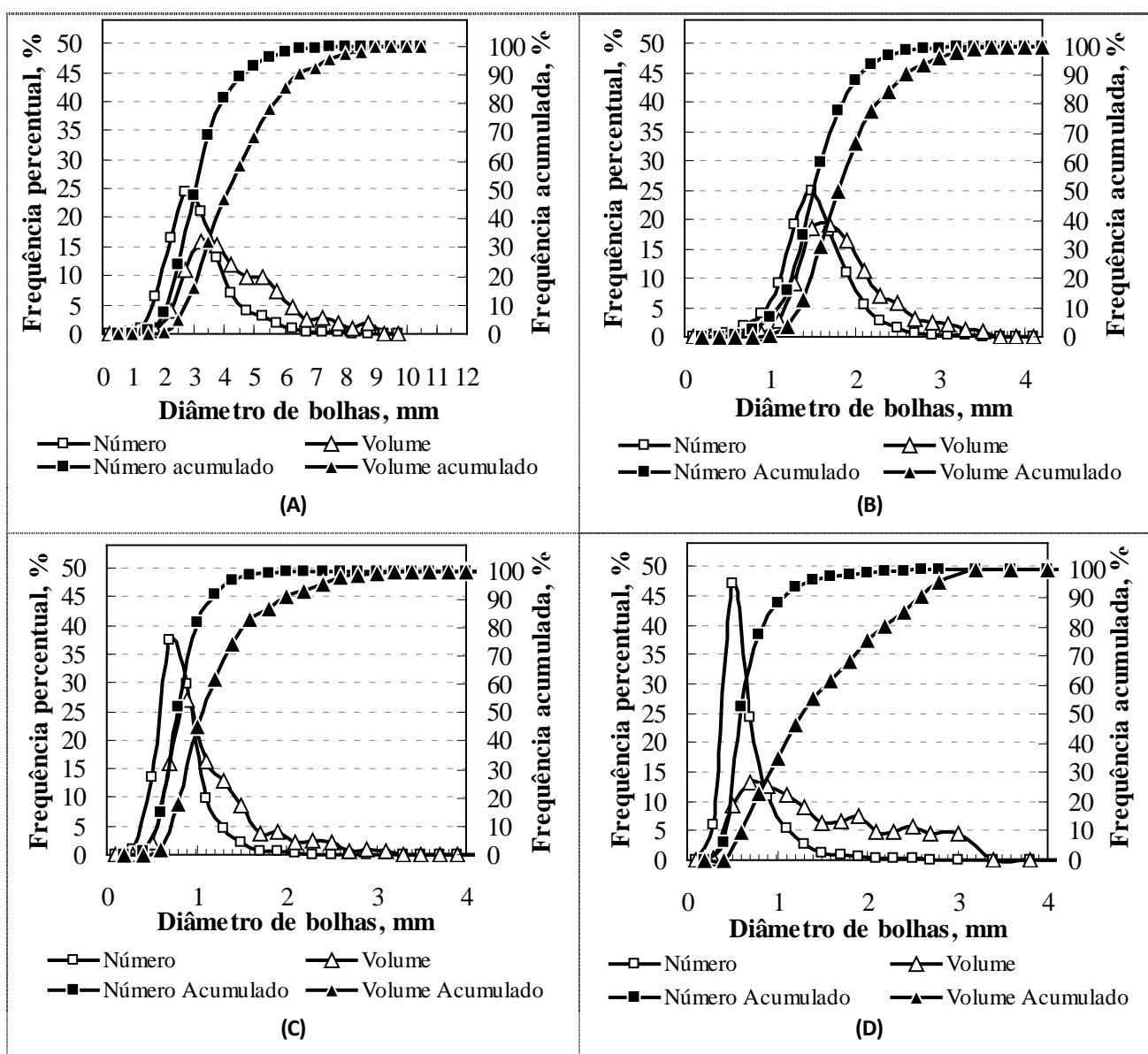


Figura 4. Distribuição de tamanho de bolhas em função de diferentes concentrações de DF-250. Condições experimentais: Vazão de líquido: 1 m³/h, vazão de ar: 20 L/min; [DF-250]: (a) 0 mg/L; (b) 5 mg/L; (c) 10 mg/L; (d) 15 mg/L.

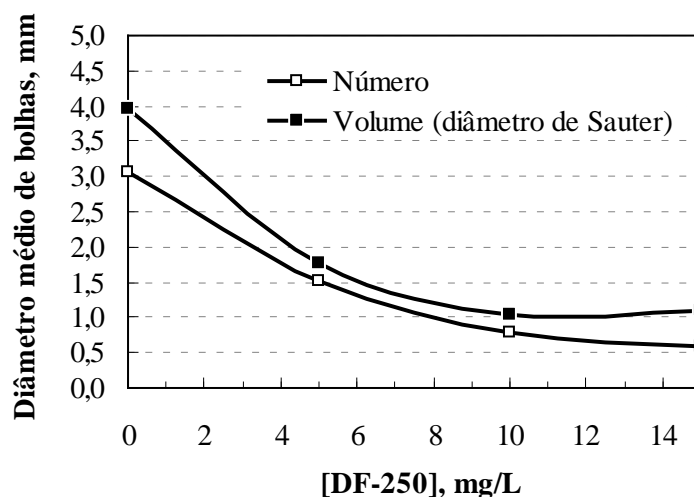


Figura 5. Variação do diâmetro médio de bolha em função da concentração de espumante DF 250.

Conforme observado na Figura 6, a velocidade superficial de gás (J_g) medida pelo presente sistema mostrou uma correlação linear satisfatória com os valores de J_g estimados a partir da vazão global de ar injetado na coluna para diferentes concentrações de DF 250, sugerindo que este equipamento pode ser utilizado para medir de forma conjunta os parâmetros de dispersão J_g e tamanho de bolha.

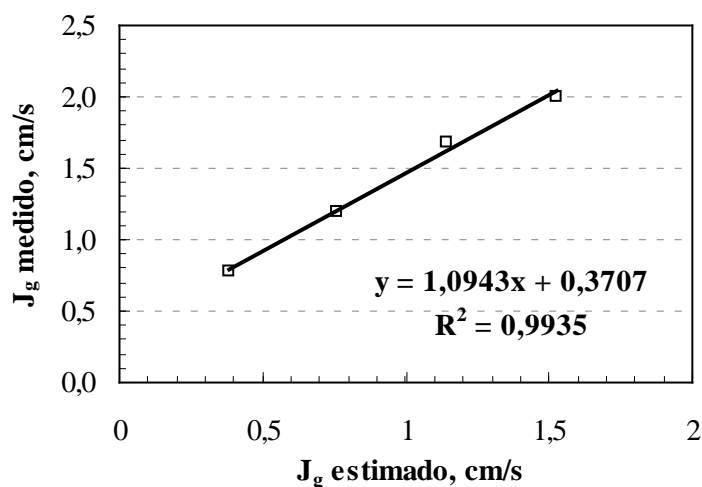


Figura 6. Correlação entre as velocidades superficiais de gás (J_g) estimadas e medidas.

4. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um equipamento automatizado para determinação da distribuição de tamanho de bolhas de ar em sistemas de flotação por análise de imagens. A distribuição de tamanho de bolhas geradas por um sparger MinnovEX foi fortemente influenciada pela concentração de espumante (DF 250) até 10 mg/L. Concentrações a partir de 10 mg/L pouco influenciaram no diâmetro médio de bolha, sugerindo uma concentração de coalescência crítica (CCC) para este espumante neste valor. A velocidade superficial de gás (J_g) medida

pelo presente sistema mostrou uma correlação linear satisfatória com os valores de J_g estimados a partir da vazão global de ar injetado na coluna para diferentes concentrações de DF 250. Assim, este equipamento apresenta potencial para caracterização de dispersões de ar em equipamentos de flotação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todas as instituições que financiam a pesquisa científico-tecnológica no Brasil.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aldrich, C., Feng, D., 2000. The effect of frothers on bubble size distributions in flotation pulp phases and surface froths, *Minerals Engineering* 13(10-11), pp.1049-1057.

Burgess, F.L., 1997. OK100 tank cell operation at Pasminco—Broken Hill. *Minerals Engineering* 10 (7), 723-741.

Cho, Y.S. and Laskowski, J.S., 2002a. Bubble coalescence and its effect on dynamic foam stability, *Can. J. Chem. Eng.*, 80(2), pp. 299-305.

Cho, Y.S. and Laskowski, J.S., 2002b. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability, *International Journal of Mineral Processing*, 64, pp. 69-80.

Deglon, D.A., Egya-Mensah, D., Franzidis, J.P., 2000. Review of hydrodynamics and gas dispersion in flotation cells on South African platinum concentrators. *Minerals Engineering* 13 (3), 235-244.

Finch, J., Xiao, J., Hardie, C., Gomez, C.O., 2000. Gas dispersion properties: Bubble surface area flux and gas holdup, *Minerals Engineering*, 13(4), pp. 365-372.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. Manlapig, E.V., 1995. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in industrial scale flotation cell – part 1: Effect on bubble size distribution, *Minerals Engineering*, 8(6), pp. 615-635.

Gorain, B.K., Franzidis, J.-P. Manlapig, E.V., 1996. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in industrial scale flotation cell – part 3: Effect on superficial gas velocity, *Minerals Engineering*, 9(6), pp. 639-654.

Grau, R.A., Heiskanen, K., 2003. Gas dispersion measurements in a flotation cell, *Minerals Engineering*, 16, pp. 1081-1089.

Hernandez-Aguilar, J.R., Coleman, R.G., Gomez, C.O., Finch, J.A., 2004. A comparison between capillary and imaging techniques for sizing bubbles in flotation systems, *Minerals Engineering*, 17(1), pp. 53-61.

Laskowski, J.S., Tlhone, T., Williams, P., Ding, K., 2003. Fundamental properties of the polyoxypropylene alkyl ether flotation frothers. *International Journal of Mineral Processing*, 72 (1-4), 289-299.

Randall, E.W., Goodall, C.M., Fairlamb, P.M., Dold, P.L., O'Connor, C.T., 1989. A method for measuring the sizes of bubbles in two-and three-phase systems, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 22, pp. 827-833.

Sweet, C., van Hoogstraten, J., Harris, M., Laskowski, J.S., 1997. The effect of frothers on bubble size and frothability of aqueous solutions. In: Finch, J.A., Rao, S.R., Holubec, I. (Eds.), *Processing of Complex Ores – Proc. 2nd UBC-Mc Gill Int. Symp. Metallurgical Society of CIM*, Montreal, pp. 235-245.

Tucker, J.P., Deglon, D.A., Franzidis, J.P., Harris, M.C., O'connor, C.T., 1994. An evaluation of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell, *Minerals Engineering* 7(5-6), pp. 667-680.

Yianatos, J., Bergh, L., Condori, P., Aguilera, J., 2001. Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial flotation banks for control purposes. *Minerals Engineering* 14 (9), 1033–1046.