



SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL DA EXPANSÃO DO DIÂMETRO E ÁREA DE BOLHAS DE AR AO LONGO DO EIXO VERTICAL DE CÉLULAS DE FLOTAÇÃO

OLIVEIRA, A.V.¹, SOUZA PINTO, T.C.², LEAL FILHO, L.S.³

¹Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Laboratório de Fenômenos de Transporte e Química de Interfaces. E-mail: alevaleoliveira@usp.br

²Instituto Tecnológico Vale (ITV), Mineração. E-mail: thiago.souza@itv.org

³Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Laboratório de Fenômenos de Transporte e Química de Interfaces. E-mail: lauleal@usp.br

RESUMO

Este trabalho tenta simular experimentalmente o que ocorre com o diâmetro (D_b) e área (A_b) de bolhas de ar ao longo do eixo vertical de células de flotação que concentram minério de ferro (polpa com 50% de sólidos p/p e massa específica de 1.428 kg/m^3). Adotaram-se dois equipamentos hipotéticos: coluna e célula mecânica de alturas iguais a 23m e 3m, respectivamente. A magnitude de D_b foi determinada pela captura da imagem da bolha por meio do goniômetro Kruss DSA100HP sob ampla variação da pressão manométrica externa (0 a 300kPa) e A_b foi calculado. Esta abordagem permitiu determinar a expansão de D_b e A_b ao longo da altura do equipamento: D_b aumentou em torno de 60% e A_b aumentou aproximadamente 160% à medida que a pressão manométrica externa reduzia da base (300kPa) até o topo (0kPa) da célula. Tais resultados indicam que bolhas são muito mais susceptíveis à expansão na coluna de 23m de altura do que em célula mecânica de 3m. Tal diferença de comportamento pode contribuir para que partículas grossas apresentem menor recuperação nas colunas do que em células mecânicas. Esta hipótese constitui o escopo de uma dissertação de mestrado em curso na Escola Politécnica da USP.

PALAVRAS-CHAVE: Flotação, Bolha de ar, Pressão manométrica.

ABSTRACT

This work attempts to simulate what happens with diameter (D_b) and area (A_b) of gas bubbles along the vertical axis of flotation cells that concentrate iron ore (slurry containing 50% of solids w/w and specific gravity of $1,428 \text{ kg/m}^3$). Two hypothetical equipment were approached: column and mechanical cells of height equal to 23m and 3m, respectively. The magnitude of D_b was determined by bubble image captured by goniometer Kruss DSA100HP under a large range of manometric external pressure (0 to 300 kPa) and A_b was calculated accordingly. This approach allowed determining the expansion of D_b and A_b along the height of equipment: D_b increased around 60% and A_b 160% as the external manometric pressure decreased from the basis (300 kPa) to the top (0 kPa) of the cells. The results indicate that air bubbles are much more susceptible to expansion in a column of 23m than in a large mechanical cell of 3m of height. Such a diverse behavior may contribute towards large particles show lower recovery in columns than in mechanical cells. This hypothesis constitutes the scope of a dissertation currently underway at Polytechnic School of the University of São Paulo.

KEYWORDS: Flotation, Air bubbles, Manometric pressure.

1. INTRODUÇÃO

A flotação é uma operação unitária muito utilizada na concentração de minerais, fazendo uso de sua molhabilidade seletiva (natural ou induzida) para efetuar a separação. Para que as partículas hidrofóbicas sejam coletadas por bolhas de ar e se reportem ao produto flutuado, é necessário que ocorram com sucesso três eventos: (i) colisão entre partículas e bolhas; (ii) adesão e formação do agregado partícula/bolha; (iii) preservação do agregado formado. Se algum destes três eventos falhar, o desempenho do processo será comprometido, visto que acarretará em atraso na sua cinética. Proposto inicialmente por Derjaguin e Dukhin (1961), a eficiência de coleta (E_k) na flotação corresponde ao produto da eficiência desses três eventos, como descreve a Eq. 1, em que, E_c é a eficiência de colisão; E_a é a eficiência de adesão; e E_s é a eficiência de estabilidade (RALSTON, 2000).

$$E_k = E_c \cdot E_a \cdot E_s \quad (1)$$

A eficiência de colisão (E_c) é influenciada por fatores hidrodinâmicos da célula, como velocidade da bolha, turbulência, densidade e principalmente diâmetro da partícula e da bolha. Por outro lado, a eficiência de adesão (E_a) é governada principalmente por fenômenos interfaciais influenciados pelo ângulo de contato e tempo de indução. A estabilidade do agregado partícula/bolha (E_s) depende tanto de variáveis hidrodinâmicas (turbulência presente nos equipamentos) como interfaciais (ângulo de contato). Neste caso, a turbulência trabalha no sentido de destruir o agregado partícula/bolha, enquanto a adesão (controlada pelo ângulo de contato) contribui para preservá-lo (GRANO, 2006; DUAN, FORNASIERO e RALSTON, 2003; RODRIGUES e LEAL FILHO, 2010).

O aumento do diâmetro das bolhas (D_b) ao longo da altura das células de flotação pode influenciar negativamente tanto a eficiência de colisão (quanto maior D_b mais baixa a eficiência) como também a estabilidade do agregado partícula/bolha, visto que a expansão da área pode contribuir para que bolhas se soltem das partículas. O objetivo deste trabalho é medir o diâmetro de bolhas de ar que são submetidas a crescentes níveis de pressão manométrica, inferindo como aumento do diâmetro e/ou área das bolhas poderia interferir no desempenho do processo de flotação que é executado em células de coluna versus mecânicas.

Em células de flotação, a pressão manométrica diminui de sua base ao topo, conforme ilustra a Tab.1. Admitindo-se uma polpa de minério de ferro que contém 50% de sólidos, apresentando massa específica de 1.428kg/m^3 e considerando um hold up de 10%, temos que a pressão manométrica é nula no topo e 300kPa em profundidade de 21,4m, que é possível de ocorrer em colunas de flotação (Fig.1A). Por outro lado, pressões manométricas de 42kPa são esperadas de ocorrer somente em células mecânicas de grande porte, sempre que a polpa apresentar uma profundidade (ou altura) da ordem de 3,0m (Fig. 1B).

Tabela 1. Relação entre pressão hidráulica e profundidade de uma coluna de flotação.

Profundidade (m)	Pressão manométrica (kPa) (*)	Pressão total = Pressão hidráulica + Pressão atmosférica (kPa)
0	0	93,2
3,0	42	135,2
7,2	100	193,2
14,3	200	293,2
21,4	300	393,2

(*) Determinada para uma altitude de 760m em células de flotação que processam polpa de minério de ferro contendo 50% de sólidos e massa específica de 1.428kg/m^3 .

O diâmetro de bolhas de ar em células de flotação é consequência do equilíbrio entre a pressão que o gás exerce nas paredes das bolhas (pressão interna, P_i) e a (pressão externa, P_e) que é exercida pela polpa sobre as paredes da bolha. Tal pressão externa é controlada pela pressão manométrica. O fenômeno é ilustrado na Fig.2.

A diferença de pressão ($\Delta P = P_i - P_e$) ao longo de uma interface curva é expressa pela Equação de Young-Laplace (Eq. 2), onde γ é a tensão superficial do líquido, assim como R_1 (raio maior) e R_2 (raio menor) constituem os raios de curvatura de uma bolha com formato elipsoide. Para bolhas perfeitamente esféricas temos Eq. 3, que é uma forma simplificada da Eq. 2. Uma vez que o diâmetro de uma bolha D_b é o dobro de seu raio, para bolhas esféricas, é válida a Eq. 3, onde a diferença de pressão também pode ser escrita em função do diâmetro de uma bolha esférica.

$$\Delta P = (P_i - P_e) = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

$$\Delta P = (P_i - P_e) = \frac{2\gamma}{R} = \frac{4\gamma}{D_b} \quad (3)$$

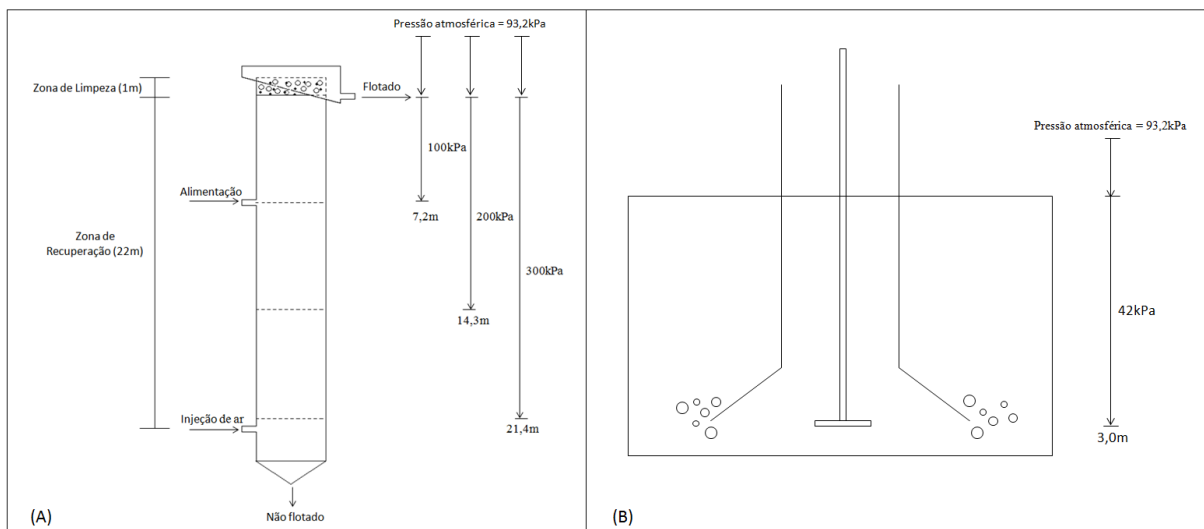


Figura 1. Pressão manométrica ao longo do eixo vertical de (1A) coluna de flotação e (1B) célula mecânica para polpa que apresenta massa específica de 1428kg/m^3 .

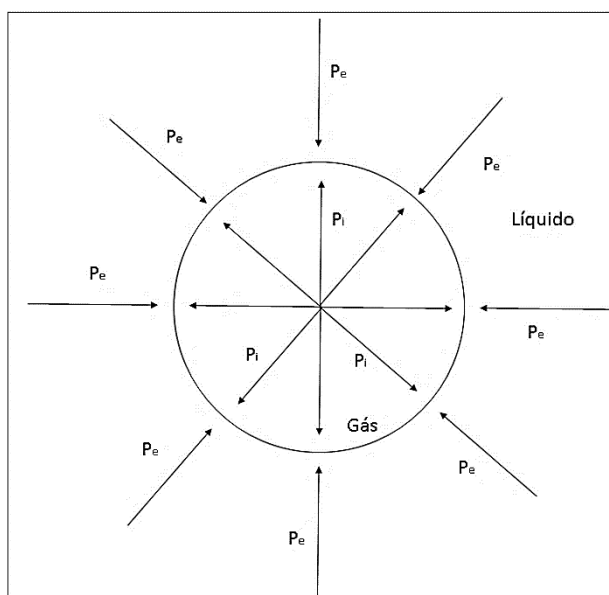


Figura 2. Pressão interna e externa a que está submetida uma bolha de ar localizada dentro de uma célula de flotação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Diâmetro de bolha foi medido sob pressão manométrica compreendida entre 0kPa e 300kPa no goniômetro Kruss DSA100HP (Fig.3). Uma bolha era colocada em contato com placa polida de quartzo que estava imersa em água destilada que exibia pH=10,5 (corrigido com NaOH). O equipamento media o diâmetro da bolha através do seu perfil e também o ângulo formado entre a placa de quartzo, a bolha e o meio aquoso (ângulo de contato). Devido ao fato do quartzo apresentar comportamento hidrofílico, a magnitude do ângulo de contato (θ) ficou na faixa de 12° a 14° , distorcendo ligeiramente o perfil da bolha. Antes de cada medida, a placa de quartzo era imersa em água régia (mistura de ácido nítrico e clorídrico na proporção molar de 1:3) durante 5 minutos, seguida de 5 minutos em banho de ultrassom. Ao final de tal procedimento de limpeza, a seção de quartzo era lavada três vezes com álcool etílico, seguida por exaustiva lavagem com água destilada.

Conforme ilustra a Fig.3, o goniômetro Kruss DSA100HP é dotado de uma câmara de pressão, que é preenchida pela água no qual a seção polida de quartzo estava imersa. O equipamento é dotado de um dispositivo de geração individual de bolha que consiste na passagem de ar (em regime de bateladas) através do orifício de uma agulha cujo diâmetro interno é de 0,8mm. Ao se desprender da agulha, a bolha ascende até tocar a placa de quartzo, quando sua imagem é capturada por uma câmara fotográfica e seu perfil analisado pelo software Kruss ADVANCE, que determina diâmetro de bolha (D_b) e ângulo de contato (θ). Em cada rotina experimental, uma bolha era gerada sob pressão manométrica de 0kPa, seguida de 100kPa, 200kPa e 300kPa, na tentativa de reproduzir a pressão externa que é experimentada por uma bolha em célula de flotação.

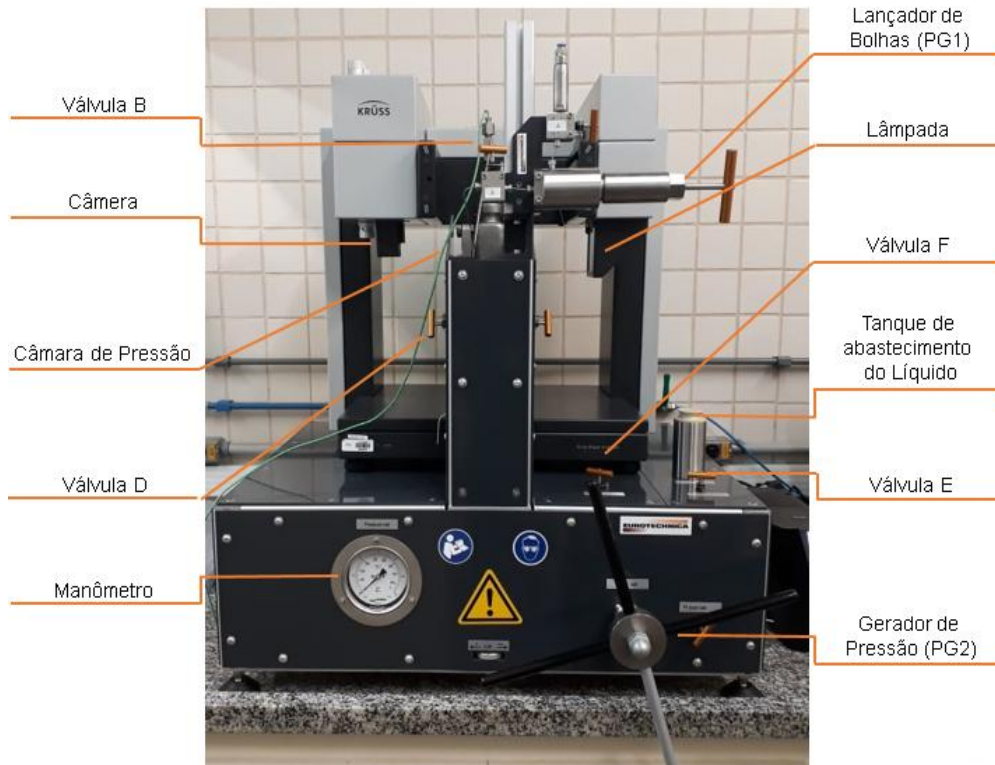


Figura 3. Equipamento DSA100HP utilizado para medir diâmetro de bolha sob influência da pressão externa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Medidas preliminares de D_b em função da pressão manométrica mostraram bolhas de perfil esférico, indicando a validade da Eq.3. Tal perfil de bolha é ilustrado na Fig.4 sob pressão manométrica de 0kPa e 300kPa.

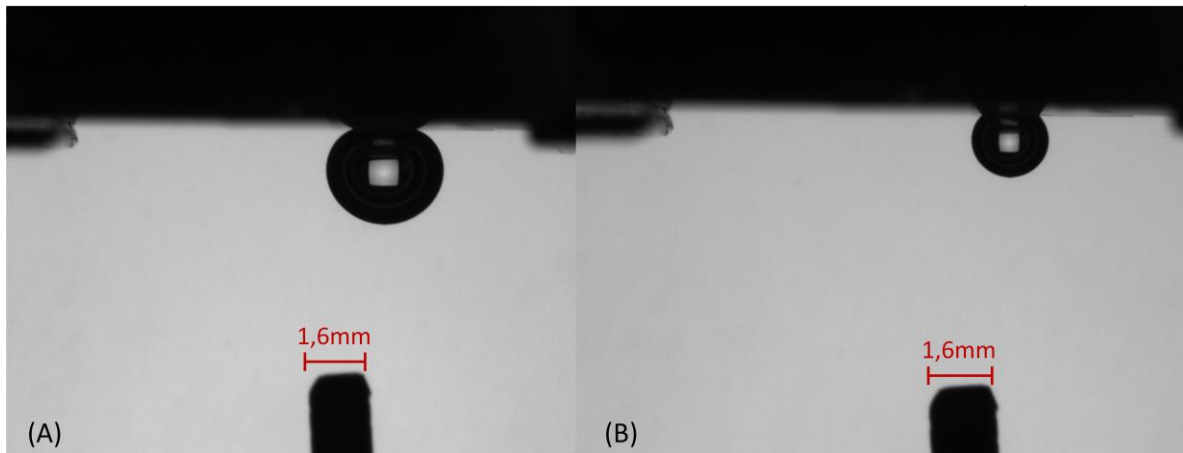


Figura 4. Perfil de uma mesma bolha submetida a pressão manométrica de 0kPa (A) e 300kPa (B) gerado através do equipamento DSA100HP.

A Tab. 2 exhibe valores da magnitude de D_b em função da pressão externa à bolha (pressão manométrica). Cada valor de D_b corresponde à média aritmética de, no mínimo, quatro medidas obtidas com um diâmetro inicial de bolha, cujo erro relativo máximo é de 3%. O comportamento de D_b e área da bolha (A_b) em função da pressão externa (P_e), expressa em valores absolutos, é exibida na Fig. 5 e Fig. 6, onde se verifica que um aumento da pressão externa implica em diminuição de volume e área. Numa célula de flotação, como as bolhas são geradas na base do equipamento, é realista esperar aumento de diâmetro e

área à medida que a bolha ascende e experimenta alívio contínuo de pressão. Observou-se aumento da ordem de 60% em D_b e 160% na área da bolha quando a pressão manométrica diminuiu de 300 kPa (base da célula de flotação) para 0kPa (topo da célula de flotação).

O aumento de D_b e A_b quando a bolha ascende ao longo do eixo vertical das células é muito mais intenso nas colunas (pressão manométrica máxima de 300kPa na base de uma coluna com altura hipotética de 23m) do que células mecânicas convencionais (42 kPa na base de uma célula com altura hipotética de 3m). O aumento no diâmetro das bolhas pode justificar uma mais baixa recuperação das partículas grossas em colunas, tendo em vista que E_s pode diminuir com o aumento de D_b . Segundo Tao (2005), o uso de bolhas menores diminui o destacamento de partículas grosseiras das bolhas e aumenta o limite superior de tamanho da coleta de partículas na flotação. Além disto, à medida que a bolha caminha para o topo da coluna, a expansão sofrida pela mesma pode gerar um aumento da micro turbulência do meio, provocando o rompimento do agregado partícula/bolha. Tal premissa ainda se encontra em investigação, o que constitui o escopo da dissertação de mestrado de um dos autores deste trabalho.

Tabela 2. Diâmetro da bolha em função das pressões.

Séries de Medidas	P_e (Pa) (Pressão)	D_b (mm)	Área da bolha (mm^2)	Acréscimo de diâmetro (%)	Acréscimo de área (%)
1	393219,0	$1,48 \pm 0,04$	6,90	0	0
	293219,0	$1,65 \pm 0,04$	8,57	11	24
	193219,0	$1,90 \pm 0,05$	11,35	28	65
	93219,0	$2,43 \pm 0,04$	18,48	64	168
2	393219,0	$1,62 \pm 0,04$	8,20	0	0
	293219,0	$1,80 \pm 0,05$	10,18	11	24
	193219,0	$2,08 \pm 0,06$	13,59	29	66
	93219,0	$2,58 \pm 0,02$	20,91	60	155

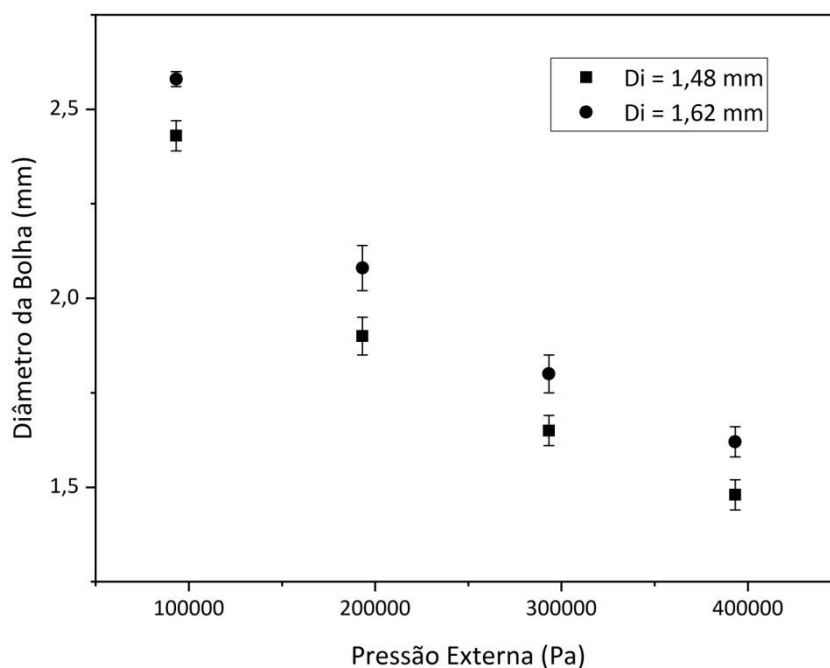


Figura 5. Diâmetro de bolha em função da pressão externa aplicada.

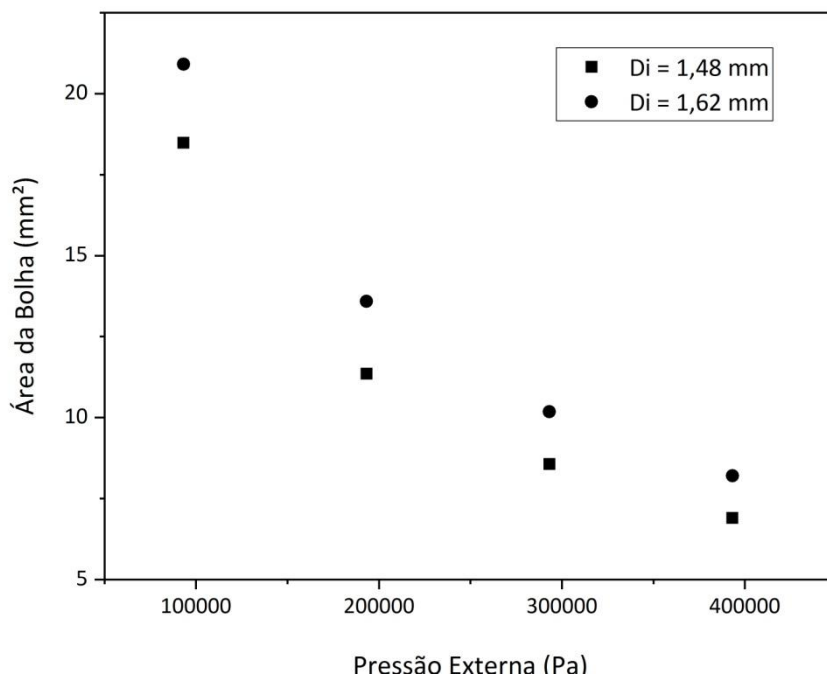


Figura 6. Área da bolha em função da pressão externa aplicada.

4. CONCLUSÕES

Dentro dos limites desta investigação, verificou-se que diâmetro de bolha (D_b) e sua área (A_b) aumentam com alívio da pressão externa (P_e) aplicada ao sistema. Tal aumento é da ordem de 60% para D_b e 160% para A_b quando a pressão externa (manométrica) varia de 300 kPa para 0 kPa. Devido ao fato de bolhas serem geradas nas cotas das células, é de se esperar que elas sofram aumento de D_b e A_b ao longo de sua trajetória vertical ascendente. Tal expansão, mais intensa em colunas do que em células mecânicas, pode contribuir para o destacamento de partículas grossas previamente aderidas a bolhas, prejudicando sua recuperação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- DERJAGUIN, B. V.; DUKHIN, S. S. Theory of flotation of small and medium size particles. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, v. 70, p. 221 – 246, 1961.7
- DUAN, J.; FORNASIERO, D. RALSTON, J. Calculation of the flotation rate constant of chalcopyrite particles in an ore. International Journal of Mineral Processing, v.72, n. 1 – 4, p. 227 – 237, 2003.
- GRANO, S. Effect of impeller rotational speed on the size dependent flotation rate on galena in full scale plant cells. Minerals Engineering, v.19, n. 13, p. 1307 – 1318, 2006.
- LEAL FILHO, L.S. Flotação de Apatita em Células Mecânicas: Aumento da recuperação de partículas grossas através do controle de variáveis hidrodinâmicas (Fase II). Relatório Final submetido ao CNPq. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2009, 31p.
- RALSTON, J. Bubble-particle capture. In: CASTRO, S.; ALVAREZ, J. Flotation II. Chile: Andros, 2000. v. 2, p. 1464 – 1471.

RODRIGUES, W. J.; LEAL FILHO, L. S. Importance of hydrodynamics in coarse particle flotation kinetics. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 63. n. 4, p. 615 – 620, 2010.

TAO, D. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles – a review. Separation Science and Technology, v. 39, n. 4, p. 741 – 760 2005.