



RECUPERAÇÃO DE PARTÍCULAS GROSSAS POR FLOTO-ELUTRIAÇÃO

SEGER, M.A.¹, RODRIGUES, R.T.¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia de Minas,
Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental . e-mail: marco.seger@ufrgs.br

RESUMO

Um dos benefícios da flotação de partículas grossas, esta relacionado com a diminuição dos custos de cominuição, bem como a redução da geração de partículas finas e ultrafinas. O processo de floto-elutriação tem se mostrado uma alternativa promissora para a recuperação de partículas grossas + 250 μm , pois além de operar com menores velocidades superficiais de gás, o que reduz significativamente a energia turbulenta dentro na zona de coleta, diminuindo assim as forças de ruptura do agregado bolha/partícula, a floto-elutriação trabalha em fluxo contracorrente (água de elutriação), o que diminui a velocidade de sedimentação das partículas, aumentando assim o tempo de residência, e a probabilidade de colisão bolha/partícula. O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência da velocidade superficial do gás (J_g), líquido (J_l) e o diâmetro médio de bolha (D_{sauter}) na recuperação de partículas grossas (-500 + 250 μm) por floto-elutriação e comparar com métodos convencionais de flotação (denver flotation cell).

PALAVRAS-CHAVE: Floto-elutriação, elutriação, partículas grossas, tamanho de bolha

ABSTRACT

One of the benefits of coarse particle flotation is related to the reduction of comminution costs as well as the reduction of the generation of fine and ultrafine particles. The floto-elutriation process has shown to be a promising alternative for the recovery of coarse particles + 250 μm , as well as to operate with lower superficial velocities of gas, which significantly reduces the turbulent energy inside the collection zone, thus reducing the rupture forces of the aggregate bubble/particle, the floto-elutriation works in countercurrent flow (elutriation water), which slows down the settling velocity of particles, thus increasing residence time, and the likelihood of bubble/particle collision. The objective of the present work was to study the influence of the surface velocity of the gas (J_g), liquid (J_l) and the average bubble diameter (D_{sauter}) on the recovery of coarse particles (-500 + 250 μm) per floto-elutriation and compare with conventional flotation (denver flotation cell).

KEYWORDS: Floto-elutriation, elutriation, coarse particles, bubble size.

1. INTRODUÇÃO

Partículas minerais dos mais variados tamanhos são encontradas na polpa durante a flotação. O tamanho da partícula pode variar de décimos de milímetro a micrômetro. A prática industrial e as numerosas investigações mostram que a recuperação das partículas depende de seu tamanho. Dessa forma, o tamanho das partículas minerais presentes na polpa torna-se, também, uma importante variável na sequência de eventos que levam à flotação de uma partícula (TRAHAR, 1981; BAZIN e PROULX, 2001). A diminuição da recuperação de partículas grossas está principalmente relacionada ao desprendimento, enquanto as partículas finas, são devidas a uma colisão ineficiente (DAI et al, 2000; GONTIJO et al, 2007; AWATEY et al, 2013). Estudos realizados por GONTIJO et al, 2007; AWATEY et al, 2014 mostraram altas recuperações para partículas com tamanhos até 1180 μm , para altos valores de ângulo de contato.

A floto-elutriação, ao contrário de um separador de leito fluidizado tradicional, opera com uma injeção contínua de bolhas de ar, mantendo condições de fluxo não turbulento e, assim, obtendo maior seletividade associada à separação por flotação de partículas hidrofóbicas. Em comparação com a flotação convencional, a floto-elutriação opera com menores velocidades superficiais de gás, resultando em uma menor turbulência e, portanto, uma condição hidrodinâmica mais favorável à flotação de partículas grossas. O transbordo do material elutriado aumenta a recuperação destes agregados formados (AWATEY et al, 2014; KOHMUENCH et al, 2007; 2010; 2013).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostra

Os estudos foram realizados com uma amostra de areia quartzoza com densidade $2.63\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, com composição química de 89.6% (SiO_2), 5.08% (Al_2O_3) e 5.32% de outros minerais. Esse material foi peneirado a seco em peneiras com malhas: 35 # (500 μm), 60 # (250 μm). O produto retido na malha de 60 # foi homogeneizado e quarteado pelo método de fracionamento de pilha cônica.

2.2 Estudo de elutriação no hidrofloat™ - E.

Para avaliar a recuperação por elutriação, 600 mL de polpa com 20% de sólidos (foi utilizado 20% de sólidos por questões operacionais de recirculação do *underflow*) foram alimentados no HydroFloat™ por gravidade, que foi previamente preenchido com uma solução de (9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) um espumante. O espumante flotanol D 25 (Clariant®), foi usado nos experimentos para controle do tamanho da bolha. O espumante D 25 é um metil éter de polipropilenoglicol. Autores relatam que acima dessa concentração de coalescência (9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), a bolha deixa de coalescer e alcança seu tamanho médio final de *Sauter* (CHO et al, 2002; GRAU et al, 2005; GRAU e HEISKANEN, 2005). O fluxo ascendente de água necessário para a elutriação foi fornecido através da injeção de água (água da rede de abastecimento municipal, Porto Alegre / RS) previamente condicionada com flotanol D 25 (concentração final de 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). O fluxo de ar foi controlado por rotâmetro a pressão de 2 $\text{Kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$. O tempo inicial (T_0) dos experimentos foi contado a partir do início do transbordamento da

espuma. O tempo de duração das experiências foi de 10 minutos. O fluxo de polpa descarregado no fundo da célula foi mantido constante por uma bomba, que recircula a polpa para a alimentação. No final dos testes, o concentrado e os rejeitos foram recolhidos, filtrados, secos e pesados.

2.3 Estudo de floto-elutriação no hidrofloata™ - FE

Para avaliar a floto-elutriação o procedimento foi o mesmo, entretanto a polpa foi condicionada com o coletor Alkyl Eter Amina (flotigian EDA-Clariant®) na concentração de 180 g.t⁻¹ durante 5 minutos e depois alimentada (transferida por gravidade) para o HydroFloat™. Em ambos os casos, as velocidades superficiais do gás (0,2; 0,27; 0,33 e 0,39 cm.s⁻¹) e as velocidades do líquido (0,63; 0,84 e 1,05 cm.s⁻¹) foram variadas. Os testes foram realizados em duplicatas

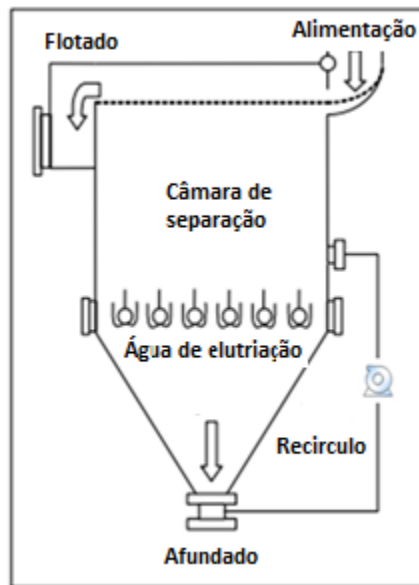


Figura 1: Esquema ilustrativo do sistema utilizado.

A flotação real (F_t) foi calculada com a Equação 1.

$$F_t = F_e - E \quad (1)$$

2.4 Determinação do tamanho de bolha.

O sistema experimental utilizado para determinação do tamanho de bolha via análise de imagem foi o mesmo descrito nos trabalhos de da Rosa Oliveira et al, (2015). As imagens foram capturadas com uma câmera SONY XC-HR70, acoplada a uma lente de zoom. As etapas de captura, processamento e análise das imagens foram automatizadas empregando um software de análise de imagens (Matrox®). O tempo para aquisição, processamento e análise de cada imagem foi de 10 s com duração de 5 minutos de experimento. A iluminação do sistema foi realizada por uma placa de LED.

2.5 Estudo de flotação convencional- FC

Os testes foram realizados em uma célula mecânica de laboratório de 1,5 L de capacidade (Denver®) com uma solução de polpa contendo 9% de sólidos (em peso) em pH 7. A polpa foi condicionada sob agitação (800 rpm) por cinco minutos com coletor Alkyl Eter Amina (flotigan EDA-Clariant®) na concentração de 180 gt^{-1} e 9 $mg.L^{-1}$ de flotanol D 25 (Clariant®) como um emulsionador. O ar foi então progressivamente injetado, entre 4 e 5,5 $L.min^{-1}$. Os concentrados foram recolhidos e foi adicionada água extra para manter o volume da célula constante. O tempo de duração das experiências foi de 10 minutos. Todos os testes foram realizados em duplicatas

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tab. 1 mostra as recuperações médias obtidas para todas as condições testadas.

Tabela 1: Condições experimentais e recuperações.

J_l ($cm.s^{-1}$)	J_g ($cm.s^{-1}$)	Recuperação Elutriação (%)	Recuperação Floto- elutriação (%)	Recuperação Flotação real (%)
0,63	0,20	3,17	5,94	2,77
0,63	0,27	4,55	8,51	3,96
0,63	0,33	4,82	7,98	3,16
0,63	0,39	4,51	5,94	1,43
0,84	0,20	11,81	17,23	5,42
0,84	0,27	11,31	16,76	5,45
0,84	0,33	10,37	15,06	4,69
0,84	0,39	9,05	17,87	8,82
1,05	0,20	15,71	24,10	8,39
1,05	0,27	18,45	20,04	1,59
1,05	0,33	17,73	19,66	1,93
1,05	0,39	14,78	19,01	4,23

Pode-se observar que a recuperação com o coletor sempre foi maior que a recuperação média sem coletor. A diferença entre a recuperação com e sem coletor variou durante os testes, mostrando que existe um ponto ótimo de operação.

3.1 Efeito da velocidade superficial do líquido.

A Fig. 2 mostra os resultados da variação da velocidade da superficial do líquido na recuperação através da elutriação e floto-elutriação. A velocidade superficial de gás foi mantida constante ($0,2 cm.s^{-1}$). Com o aumento da velocidade superficial do líquido, observou-se um ganho de recuperação tanto com o coletor (5,94% para 24,10%) como sem

o coletor (3,17% para 14,78%). Este aumento na recuperação é provavelmente devido ao aumento do arraste (elutriação) gerado na célula.

O que determinará se as partículas ascenderão ou sedimentarão será a diferença entre a velocidade de sedimentação da partícula, e a velocidade superficial do líquido. Se a velocidade de sedimentação for maior, as partículas tenderão a cair e reportar ao *underflow*; caso contrário, as partículas ascenderão e serão coletadas na corrente do *overflow*. Com a adição da água de elutriação, a uma redução na velocidade de sedimentação das partículas, em virtude disso, o tempo de residência das partículas na coluna de flotação, a probabilidade de colisão partícula/bolha e a probabilidade de flotação, tenderão a aumentar.

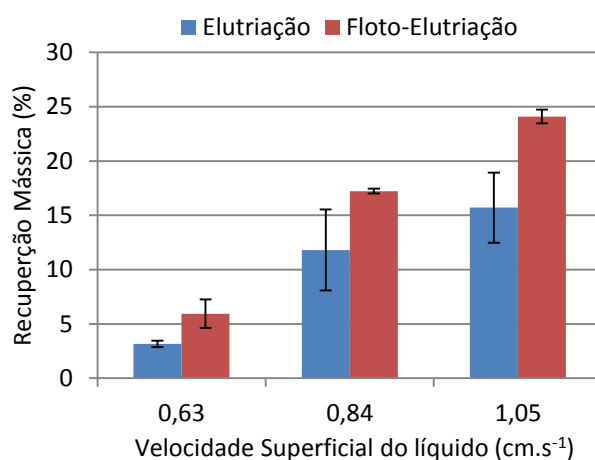


Figura 2: Recuperação por elutriação e floto-elutriação em função da velocidade superficial do líquido, quando o $J_g=0.2$ (cm.s⁻¹).

3.2 Efeito da velocidade superficial de gás.

A fig. 3 apresenta as recuperações em função da variação da velocidade da superficial do gás. Verificou-se, que a variação da velocidade superficial de gás ($J_g = 0,2$ cm.s⁻¹ a $0,39$ cm.s⁻¹), não causou um impacto significativo na recuperação.

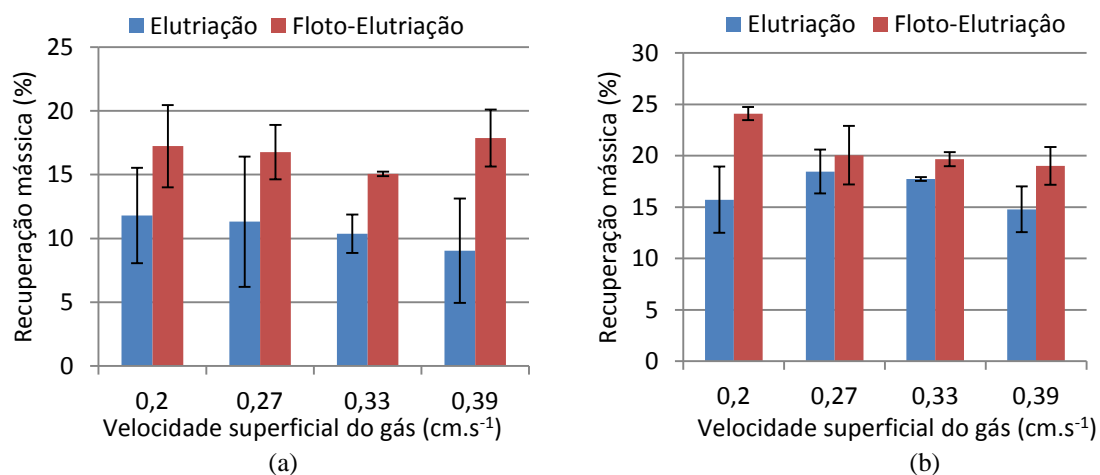


Figura 3: Recuperação por elutriação e floto-elutriação em função da velocidade superficial do gás. (a) $J_g=0,84$ cm.s⁻¹ e (b) $J_g=1,05$ cm.s⁻¹.

A maior recuperação mássica foi de 24,1% obtida através da foto-elutriação para um $J_g = 0,2 \text{ cm.s}^{-1}$, $J_l = 1,05 \text{ cm.s}^{-1}$, mas o maior aumento obtido com a adição do coletor foi na condição $J_g = 0,39 \text{ cm.s}^{-1}$ e $J_l = 0,84 \text{ cm.s}^{-1}$, onde apresentou um ganho de mais de 94% de recuperação em relação à elutriação. Este ponto deve ser o de maior seletividade, uma vez que a diferença entre o processo de elutriação e a floto-elutriação foi maior (8,82%), indicando um melhor desempenho da flotação real.

Diversos autores relatam que dentro dos limites de estabilidade da coluna, a recuperação do mineral flotado é normalmente crescente com o aumento da vazão de gás até atingir um máximo. Este crescimento na recuperação é devido ao aumento do fluxo de área superficial de bolhas (S_b) introduzidas na coluna. Porém, esse aumento na recuperação não foi notado.

3.3 Análise do tamanho de bolha.

Foi possível obter diferentes tamanhos médios de bolhas na faixa entre 1,0 e 1,5 mm, de acordo com as condições experimentais empregadas. As fig. 4, 5 mostram exemplos de imagens capturadas para diferentes velocidades superficiais de gás e líquido.

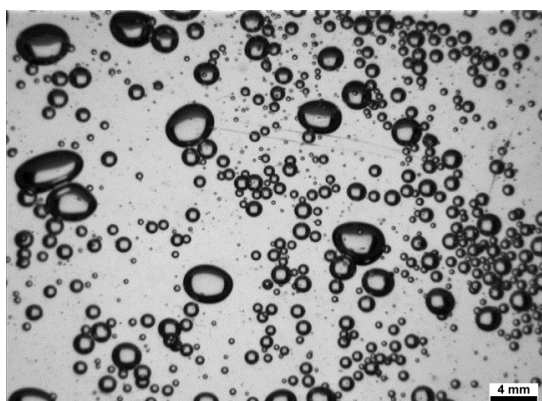


Fig 4. Tamanho de bolha 1,55 mm.

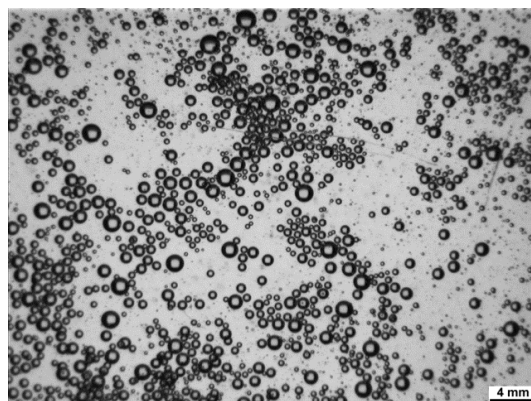


Fig 5. Tamanho de bolha 1,0 mm.

A fig. 6 mostra o tamanho da bolha em função da variação da velocidade superficial de gás. Pode ser visto que para ambas as condições houve um pequeno aumento no tamanho da bolha com a variação do gás (para mesmo J_l). Este efeito é totalmente explicado em Gontijo, 2009.

Tao (2004) deduziu, através de uma análise teórica, que um aumento no tamanho da bolha produziria um aumento na probabilidade de desprendimento de partículas grossas. Portanto, a flotação de partículas grossas pode ser aumentada usando bolhas mais finas. No entanto, partículas grosseiras ligadas a bolhas finas têm baixa flutuabilidade e, em seguida, estão sujeitas a serem descarregadas como rejeitos. Caso contrário, a levitação de partículas grossas pode ser reforçada pela formação de aglomerados de bolhas. A presença de aglomerados de bolhas em células de escala de laboratório, bem como em células de flotação industriais, foi relatada por Ata e Jameson (2004). Porém, esse aumento na recuperação não foi notado, talvez, o acréscimo da vazão de gás possa ter alterado as

condições de fluxo para um regime turbulento prejudicando o processo de formação de aglomerados de bolhas.

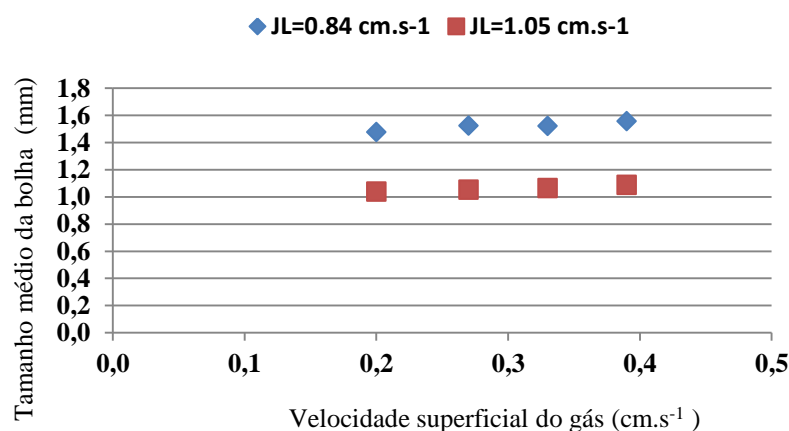


Figura 6: Tamanho médio de bolha, em função da variação da velocidade superficial do gás.

3.4 Flotação convencional (célula denver)- FC

A máxima recuperação obtida nos experimentos com célula de flotação Denver, foi de 10,5% para um J_g 0,52 cm.s⁻¹. Esta baixa recuperação de partículas grossas de quartzo também foi relatado por Vieira e Peres (2007) e foi associada ao tipo de coletor, pH e ao potencial zeta.

De acordo com Awatey et al (2013), geralmente, a recuperação de partículas grossas é baixa em células do tipo Denver por duas razões principais; a energia turbulenta excessiva criada dentro da célula pelo impulsor rotativo e a presença de uma camada de espuma na superfície da polpa que torna muito difícil que as partículas sejam transferidas da zona de polpa para a zona de espuma para recuperação. Pelo contrário, a floto-elutriação opera sob condições quiescentes que criam um ótimo ambiente hidrodinâmico para a eficiente flotação de partículas grossas.

4. CONCLUSÃO

Foram analisados dois parâmetros para a recuperação de partículas grossas por floto-elutriação, velocidade superficial do gás e líquido, e medido o tamanho médio de bolha. A variação da velocidade superficial do gás e o tamanho médio de bolha, não apresentaram um impacto significativo na recuperação, porém pode-se notar uma variação na recuperação por flotação real (1,43% a 8,82%), indicando a existência de um ponto de maior seletividade no processo.

As recuperações mássicas na FE em relação à FC foram maiores, devido ao transporte de massa via adesão bolhas/partículas ser assistido pela ação de elutriação e do maior fluxo ascendente de água (velocidade superficial do líquido). Houve um maior grau de arraste de partículas, que é independente das espécies mineralógicas (não seletivo) e depende da distribuição de tamanhos e densidade das partículas minerais.

Em comparação ao método de flotação convencional, a floto-elutriação se mostrou uma alternativa viável para a recuperação de partículas grossas, pois houve um aumento de 13,6% na recuperação total de partículas de 10,5% (*denver cell*) para 24,1% (*hydrofloat™*).

5. BIBLIOGRAFIA.

ATA, S.; JAMESON, G.J. Recovery of coarse particles in the froth phase – A case study. *Minerals Engineering*, v. 45, p. 121-127, 2013.

AWATEY, B.; THANASEKARAN, H.; KOHMUENCH, J.N.; SKINNER, W.; ZANIN, M. Optimization of operating parameters for coarse sphalerite flotation in the HydroFloat fluidised-bed separator. *Minerals Engineering*, v. 50–51, p. 99-105, 2013.

AWATEY, B.; THANASEKARAN, H.; KOHMUENCH, J.N.; SKINNER, W.; ZANIN, M. Critical contact angle for coarse sphalerite flotation in a fluidised-bed separator vs. a mechanically agitated cell. *Minerals Engineering*, v. 60, p. 51-59, 2014.

BAZIN, C.; PROULX, M. Distribution of reagentes down a flotation bank to improve the recovery of coarse particles. *International Journal of Mineral Processing*, v. 61, n. 1, p. 1- 12, 2001.

CHO, Y.S.; LASKOWSKI, J.S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability, *Int. J. Miner. Process.* 64 (2002) 69–80. doi:10.1016/S0301-7516(01)00064-3.

DA ROSA OLIVEIRA, C.; POMPEO, A.A.; SEGER, M.A.; RODRIGUES, R.T. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DO TAMANHO DE BOLHA EM UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO MINIPILOTO, *HOLOS*. 7 (2015) 80–87.

DAI, Z.; FORNASIERO, D.; RALSTON, J. Particle–bubble attachment in mineral flotation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 217, n. 1, p. 70-76, 1999.

GAUDIN, A.M.; SCHUHMANN, R.; SCHLECHTEN, A.W. The effect of size on the behavior of galena particles- Flotation Kinetics II. *J. Phys. Chem.*, v. 64, p. 902-910, 1942.

GONTIJO, C.F.; FORNASIERO, D.; RALSTON, J. The limits of fine and coarse particle flotation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 85, n. 5, p. 739-747, 2007.

GRAU, R.A.; HEISKANEN, K. Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells, *Miner. Eng.* 18 (2005) 1164–1172. doi:10.1016/j.mineng.2005.06.011.

GRAU, R.A.; LASKOWSKI, J.S.; HEISKANEN, K. Effect of frothers on bubble size, *Int. J. Miner. Process.* 76 (2005) 225–233. doi:10.1016/j.minpro.2005.01.004.

JAMESON, G.J.; NGUYEN, A.V.; ATA, S. The flotation of fine and coarse particles, *Froth Flotat. Century Innov.* (2007) 339–372.

KOHMUENCH, J.; THANASEKARAN, H.; SEAMAN, B. Advances in Coarse Particle Flotation–Copper and Gold. In: *MetPlant Conference, 2013, Perth. Proceedings...* p. 378-386.

KOHMUENCH, J.N.; MANKOSA, M.J.; KENNEDY, D.G.; YASALONIS, J.L.; TAYLOR, G.B.; LUTTRELL, G.H. Implementation of the HydroFloat Technology at the South Fort Meade Mine, *Minerals and Metallurgical Processing*, v. 24, n. 4, p. 264-270, 2007.

KOHMUENCH, J.N.; MANKOSA, M.J.; YAN, E.S.; WYSLOUZIL, H.; CHRISTODOULOU, L. Advances in Coarse Particle Flotation Industrial Minerals. In: *International Mineral Processing Congress, 25., 2010, Brisbane. Proceedings...* p. 2065- 2076.

TRAHAR, W. J. A rational interpretation of role particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, v. 2, p. 289-327, 1981.

VIEIRA, A.M.; PERES, A.E.C. The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz, *Miner. Eng.* 20 (2007) 1008–1013. doi:10.1016/j.mineng.2007.03.013