

ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO POR MEIO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA

H. J. B. COUTO^{1,2*}, R. A. E. OLIVEIRA³ e P. F. A. BRAGA¹

¹ Ciência e Tecnologia Mineral - CETEM

² Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ

hcouto@cetem.gov.br*

Artigo submetido em fevereiro/2016 e aceito em maio/2016

DOI: 10.15628/holos.2016.4126

RESUMO

Foi realizado um trabalho para avaliação da fluidodinâmica de uma coluna piloto de flotação, por de residência - DTR, em função das variáveis mais importantes do processo de flotação, como velocidade superficial de alimentação, de ar e de água de lavagem, e da concentração de espumante. Foi ainda realizado um

estudo comparativo entre as diferentes metodologias utilizadas para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de DTR, como ajuste dos modelos CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) em série e PFR (Plug-Flow Reactor) de dispersão axial, aos dados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: coluna de flotação, fluidodinâmica, distribuição de tempos de residência

FLUID DYNAMICS STUDIES IN A FLOTATION COLUMN BY RESIDENCE TIME DISTRIBUTION TECHNIQUE

ABSTRACT

This work was carried out to evaluate the fluid dynamics of a pilot column flotation, by applying a residence time distribution (DTR) technique, as a function of key variables on flotation process such as superficial velocities of air, feed and wash water, as well as frother concentration. It was also carried out a comparative

study between the different methodologies used to determine hydrodynamic parameters of DTR, such as adjusting the models CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) in series and PFR (Plug-Flow Reactor) with axial dispersion to the experimental data.

KEYWORDS: column flotation, fluid dynamics, residence time distribution.

1 INTRODUÇÃO

A teoria da Distribuição de Tempos de Residência - DTR foi criada a partir do estudo do escoamento em sistemas contínuos reais com vista a quantificar os desvios ao comportamento ideal (Danckwerts, 1953). A análise da DTR constitui em um instrumento útil e valioso para estimar a qualidade da mistura que ocorre dentro de equipamentos, incluindo as células de flotação. A técnica consiste em adicionar um elemento traçador ou marcador na entrada das células ou dos equipamentos e analisar a concentração deste traçador na saída (Levenspiel, 1999; Lima *et al.*, 2005; Santos, 2005). No processo de flotação em coluna podemos citar algumas vantagens em relação às células convencionais, como maior rendimento no processamento de minérios de granulometria mais fina, melhor controle de tamanho das bolhas geradas e adição de água de lavagem no topo da coluna, diminuindo o arraste indesejável de partículas hidrofílicas para a espuma (Dobby e Finch, 1985).

De acordo com Shukla *et al.* (2010), Mavros (1993) e Santos (2005), quanto menor a turbulência na zona de coleta, melhor o desempenho da coluna, justificado como sendo um dos principais fatores que afeta a coleta e o desprendimento da partícula mineral da bolha. Quando a mistura das fases é efetuada de maneira adequada, a ocorrência de zonas mortas ou curto-circuito é minimizada, oferecendo condições hidrodinâmicas mais apropriadas para melhor desempenho do processo de flotação. Neste sentido, o presente estudo torna-se oportuno levando-se em consideração que a eficiência do processo de flotação é afetada pelas características fluidodinâmicas do sistema. Existem poucos trabalhos na literatura sobre o tema, contendo uma análise mais aprofundada e comparativa de adequação dos principais modelos utilizados: Reator perfeitamente agitado ou Continuous Stirred-Tank Reactor - CSTR em série (tanks-in-series model) e do tipo empistonado ou Plug-Flow Reactor - PFR com dispersão axial (axial dispersion model).

O objetivo do presente estudo é avaliar a fluidodinâmica de uma coluna piloto de flotação, por meio de ensaios de DTR da fase líquida, em função de variáveis chaves do processo, tais como: velocidade superficial da alimentação, do ar e da água de lavagem e concentração de espumante. Um estudo comparativo para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos por ajuste não linear dos modelos CSTR em série e dispersão axial aos dados experimentais, será apresentado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Reagentes

Cloreto de potássio P.A. (KCl, 74,5 g/mol) em soluções de 1 mol/L, da SIGMA ALDRICH®, foi utilizado como traçador químico da fase líquida. AEROFROTH 76E (mistura de alcoóis), da Cytex Industries Inc., foi utilizado como agente espumante.

2.2 Determinação Experimental da DTR

A determinação da DTR do sistema apresentado na Figura 1 consiste em operar a coluna continuamente com vazões de ar e água previamente conhecidas, de acordo com condições operacionais recomendadas na literatura (Finch e Dobby, 1990). As faixas das variáveis avaliadas foram: velocidade superficial de alimentação (J_f), de ar (J_g) e de água de lavagem (J_w) de 0,52 - 1,05;

0,5 - 2,0 e 0 - 0,3 cm/s, respectivamente. Para a concentração de espumante (C_f) foi utilizada uma faixa de 0 a 15 mg/L.

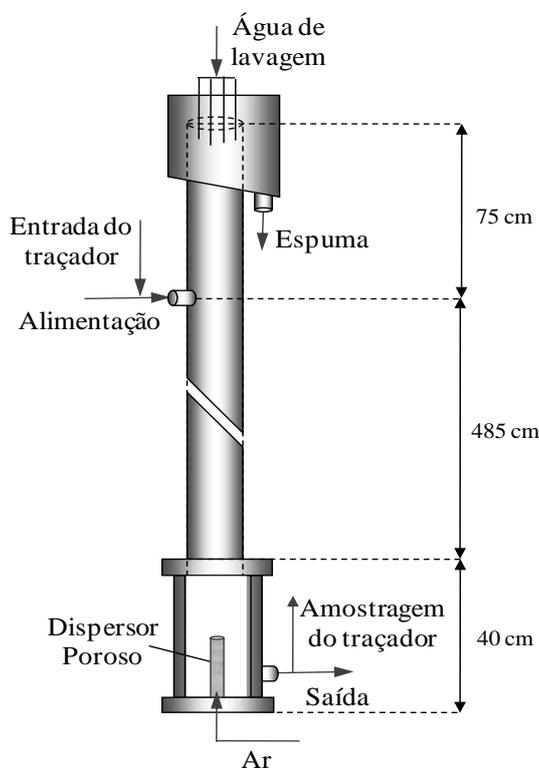


Figura 1: Coluna de flotação utilizada nos ensaios de DTR

2.2.1 Experimental/Metodologia

Estabelecido o estado estacionário, em que as variáveis operacionais do processo permanecem constantes durante o ensaio, o traçador é adicionado a um volume de 256 mL instantaneamente na alimentação da coluna (perturbação impulso) e simultaneamente um cronômetro é acionado. Em intervalos de tempos predeterminados, amostras são recolhidas no fluxo de saída para avaliação da concentração de KCl (traçador) com o tempo, utilizando medidas de condutividade elétrica (Lutron, WA-2015). Os experimentos foram realizados em uma coluna piloto de flotação, com 10,2 cm de diâmetro interno e 600 cm de altura, construída em PVC transparente e volume total de 55 L, fabricada pela Eriez Minerals Flotation Group (Canadá). O aparato é constituído ainda por um sistema de controle de nível, da vazão de água de lavagem e de ar por meio de rotômetros (Key Instruments) e bombas peristálticas (Motor Baldor-Reliancer de 0,5 HP e cabeçote Masterflex, Modelo 77490-00) para alimentação e retirada de produtos.

2.3 DTR da fase líquida na coluna de flotação

No dimensionamento de sistemas contínuos, como células de flotação, é prática a utilização do tempo de residência nominal ou tempo espacial (τ) da polpa no sistema, definido pela razão entre o volume da célula, V , e a vazão volumétrica de alimentação, Q_f , ($\tau=V/Q_f$). Em geral, as células de flotação possuem um determinado nível de agitação e mistura das fases, cuja análise de DTR

leva à obtenção do tempo de residência médio (t_m), que pode diferir muito do tempo de residência nominal (τ). Portanto, a comparação do tempo de residência médio com o tempo de residência nominal no sistema permite verificar se o escoamento é ideal (quando $\tau=t_m$), ou identificar o tipo de desvio ao escoamento ideal. Se $t_m>\tau$, há predominância de curto-circuito, caracterizado quando partes do fluido atravessarem o sistema muito mais rapidamente que os outros; e se $t_m<\tau$ indica a formação de zonas mortas ou estagnadas.

2.3.1 DTR por sistemas discretos

Para investigar a fluidodinâmica da coluna de flotação, a perturbação mais utilizada na alimentação é a do tipo impulso, em que a concentração do traçador é periodicamente monitorada na saída de fundo da coluna. Para este tipo de perturbação, a função distribuição de tempo de residência – $E(t)$, o tempo de residência médio – t_m , a variância (σ_t^2) e o número de tanques em série (N) para sistemas discretos (aproximação utilizando somatórios) podem ser encontradas na literatura pertinente (Levenspiel, 1999).

2.3.2 Modelo de tanques CSTR em série

Para N tanques de mistura perfeita iguais e em série, a função distribuição é dada pela Equação (1). Em variáveis adimensionais, em que $\theta=t/t_m$ e $E(\theta)=E(t)*t_m$, obtemos a curva experimental $E(\theta)$ versus θ (Levenspiel, 1999; Mavros *et al.*, 1989).

$$E(t) = \frac{t^{(N-1)}}{t_m^N \cdot (N-1)!} \cdot e^{-\frac{t \cdot N}{t_m}} = \frac{t^{(N-1)}}{t_m^N \cdot \Gamma(N)} \cdot e^{-\frac{t \cdot N}{t_m}}$$

Quanto maior o valor de N , menor é a dispersão da fase líquida no interior da coluna, se aproximando de um escoamento do tipo PFR (tipo empistonado ou Plug-Flow Reactor). Do contrário, quanto menor o valor de N , maior é a intensidade de mistura, se aproximando ao escoamento do tipo CSTR, de tal modo que na condição limite de $N=1$, pode-se interpretar que a coluna comporta-se como uma célula perfeitamente agitada.

2.3.3 Modelo de dispersão axial

Considera que no transporte por convecção ao longo do sistema acontece um fenômeno de dispersão axial do elemento de interesse como moléculas de fluido, partículas sólidas ou do traçador, o que acarreta um determinado nível de mistura. O modelo de dispersão axial é dado pela Equação (2), utilizando condição de contorno para fronteiras abertas à difusão, conhecida como open-open e para o parâmetro adimensional *vessel dispersion number* - $N_d > 0,01$, dado pelo inverso do número de Pe (número de Peclet), ou seja, $Pe < 100$ (Ityokumbul *et al.*, 1988; Levenspiel, 1999).

$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_m \cdot Pe}{\pi \cdot t^3}} \cdot e^{-\left(\frac{Pe \cdot (t_m - t)^2}{4 \cdot t \cdot t_m}\right)}$$

Pe é um adimensional, que representa a razão entre as velocidades de transporte por convecção e dispersão, de forma que para valores de Pe muito pequenos (tendendo a zero) o transporte por convecção é muito reduzido e o escoamento pode ser aproximado a um CSTR. Por outro lado, se Pe for muito elevado (tendendo a infinito), o transporte por dispersão é muito reduzido e o escoamento pode ser aproximado a um PFR. Mankosa *et al.* (1992) consideram que a coluna de flotação é um tipo de reator com escoamento intermediário entre as duas condições extremas citadas. Pe se relaciona com o coeficiente de dispersão axial do traçador na coluna (D) da seguinte forma: $D = (u \cdot L / Pe)$, em que u é a velocidade de escoamento do fluido ou traçador na direção axial da coluna e L é o comprimento da coluna.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente avaliou-se a DTR da fase líquida em função da velocidade superficial de alimentação da coluna (J_f), para um tempo de residência nominal entre 600 e 1200 segundos, comumente utilizado em processo de flotação em coluna. Os resultados experimentais de distribuição de tempos de residência - $E(t)$ com o tempo - (t), são apresentados na Figura 2 (a) e para a forma adimensional na Figura 2 (b). A curva de calibração obtida entre medida de concentração do KCl com condutividade elétrica apresentou coeficiente de correlação (R^2) para reta de 0,999.

Os parâmetros hidrodinâmicos foram determinados para todas as variáveis avaliadas neste trabalho, utilizando sistemas discretos, assim como os modelos de tanques CSTR em série e de dispersão axial, por meio das Equações (1) e (2), respectivamente, e os coeficientes de correlação (R^2) obtidos. Entretanto, serão apresentados aqui os principais resultados. Cabe destacar que uma das vantagens da determinação dos parâmetros t_m e N por sistemas discretos está na possibilidade de utilizá-los como valores iniciais no ajuste do modelo de tanques CSTR em série, aumentando o sucesso de convergência e diminuindo o número de iterações para obtenção dos parâmetros ajustados. Os parâmetros dos modelos foram estimados por regressão não-linear dos dados experimentais, utilizando o método de mínimos quadrados, com o software STATISTICA 12 (StatSoft, Inc., 2013). Na Figura 3(a) são apresentados os resultados de ajuste de ambos os modelos aos pontos experimentais para dois ensaios, denominados E5 ($J_f = 1,05$ cm/s) e E8 ($J_f = 0,52$ cm/s). Já na Figura 3(b) são apresentados os valores do tempo espacial ou tempo de residência teórico (τ) e de residência médio (t_m) obtidos a partir de sistemas discretos e os modelos de tanques CSTR em série e de dispersão axial em função de J_f .

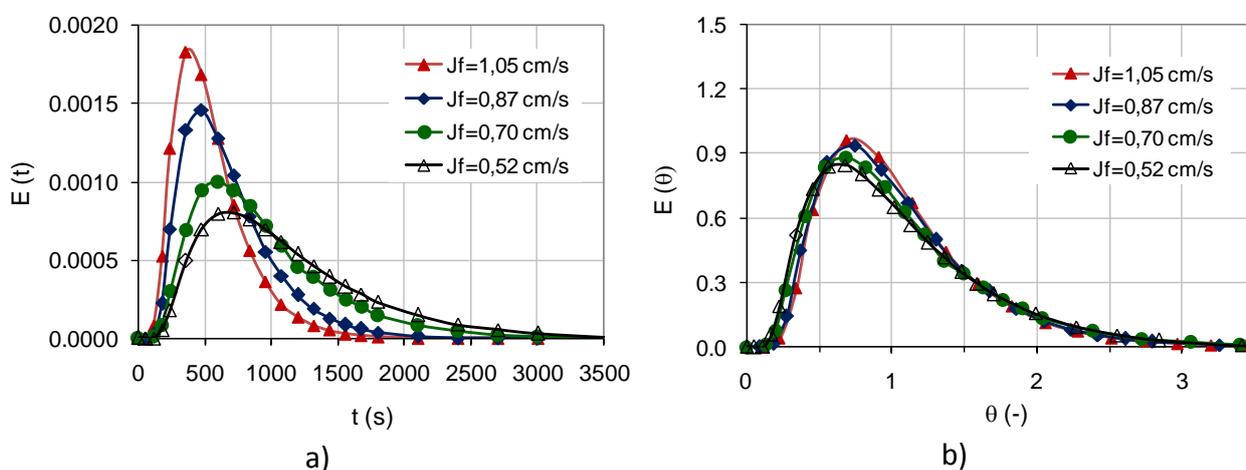


Figura 2: (a) Função de distribuição de tempos de residência com o tempo para diferentes valores de J_f e (b) em variáveis adimensionais

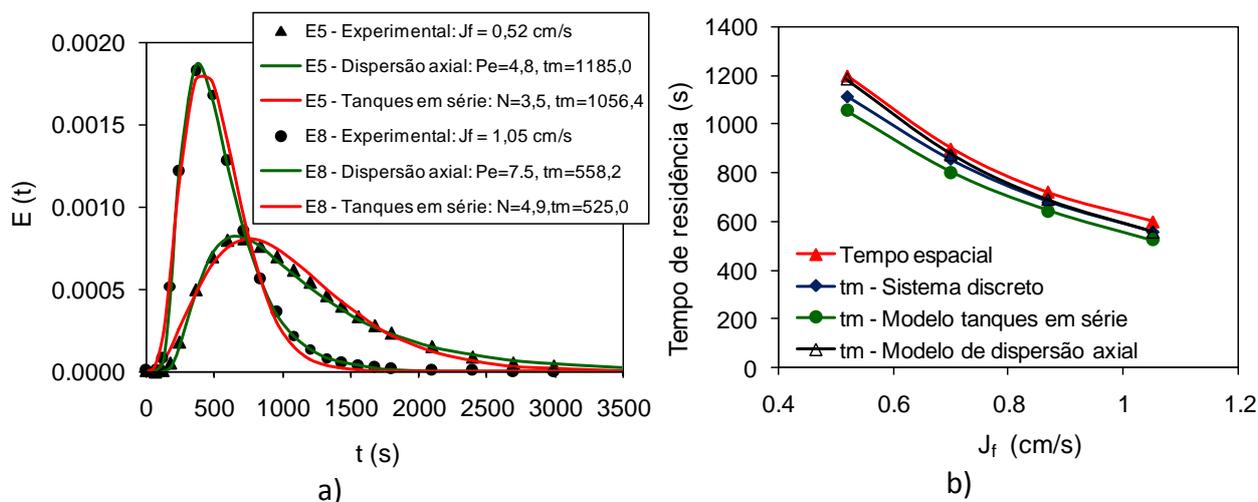


Figura 3: (a) Ajuste dos modelos de tanques CSTR em série e de dispersão axial aos pontos experimentais para E5 e E8 e (b) Tempos de residência médio obtidos a partir de sistemas discretos e os modelos avaliados ($J_g=1.5$ cm/s; $J_w = 0$ cm/s; $C_f = 0$ mg/L)

As estimativas dos parâmetros para os dois modelos fluidodinâmicos foram realizadas com sucesso, com pequena vantagem para o modelo de dispersão axial, da qual foram obtidos valores do coeficiente de correlação ligeiramente superiores aos encontrados para o modelo de tanques CSTR em série. Embora já tenha sido relatado na literatura que a condição de contorno open-open para o modelo de dispersão axial deva ser utilizado apenas para valores de Pe acima de aproximadamente 16 (Mavros, 1993), foi possível obter bons ajustes (R^2 acima de 0,99) para valores de Pe abaixo deste valor, ficando na faixa de 4 - 8. É possível observar um ajuste mais preciso para o modelo de dispersão axial, principalmente nos extremos das curvas, regiões de subida e descida (calda) da função. Resultado este constatado também pelos valores de R^2 encontrados para estes ensaios: entre 0,98 e 0,99 para o modelo de tanques em série e acima de 0,99 para o modelo de dispersão axial. Da Figura 3 (b) é possível observar que houve uma diminuição no tempo de residência médio com o aumento de J_f , conforme esperado, em função do aumento da vazão de alimentação para um volume fixo da coluna.

Na Figura 4 são apresentados os resultados dos parâmetros hidrodinâmicos N e Pe em função da velocidade superficial de alimentação em (a) e da velocidade superficial do ar (J_g) em (b), com e sem a presença do espumante AERO 76E.

Observa-se o mesmo comportamento para ambos os parâmetros de aumento do número de tanques CSTR em série (N) e número de *Peclét* (Pe) com o aumento da velocidade superficial de alimentação e uma diminuição desses parâmetros com o aumento da velocidade superficial de ar. Estes resultados mostram uma diminuição da intensidade de mistura no interior da coluna em função do aumento de J_f , corroborando com diversos trabalhos da literatura (Mavros *et al.* 1989; Mankosa *et al.*, 1992; Mavros e Danilidou 1993; Shukla *et al.*, 2010), porém divergindo dos resultados encontrados por outros autores (Goodall e O'Connor, 1991). O mais aceito na literatura é que o aumento na velocidade superficial de alimentação, que leva a um aumento na velocidade intersticial de líquido na direção axial da coluna, causa uma menor perturbação no fluxo de gás ascendente e, conseqüentemente, uma diminuição da turbulência na coluna (Mavros *et al.* 1989; Shukla *et al.*, 2010). Não obstante, o fato da coluna utilizada no presente trabalho apresentar uma

grande razão comprimento por diâmetro ($L/D \sim 54$), favorece a condição de escoamento *plug-flow* (Mankosa *et al.*, 1992).

A presença do espumante AERO 76E levou a uma diminuição de N e Pe (Figura 4 a), indicando um aumento da intensidade de mistura da coluna, explicado por uma diminuição do tamanho de bolhas e, conseqüentemente, aumento do número de bolhas por unidade de volume da coluna, para $J_g = 1,5$ cm/s (fixo). Já na Figura 4 (b), o aumento da velocidade superficial do ar na faixa avaliada aumentou a intensidade de mistura da fase líquida na coluna (menor N e Pe), conforme observado por outros autores (Mavros e Danilidou, 1993; Goodall e O'Connor, 1991; Mavros *et al.* 1989; Shukla *et al.*, 2010), também explicado pelo aumento do número de bolhas por unidade de volume. Porém, causado por um aumento da fração volumétrica de gás (*gas hold-up*) da coluna, uma vez que a velocidade superficial de alimentação para estes ensaios foi fixa ($J_f = 0.7$ cm/s). O mesmo resultado foi obtido com a presença de espumante na faixa de velocidade superficial de ar avaliada.

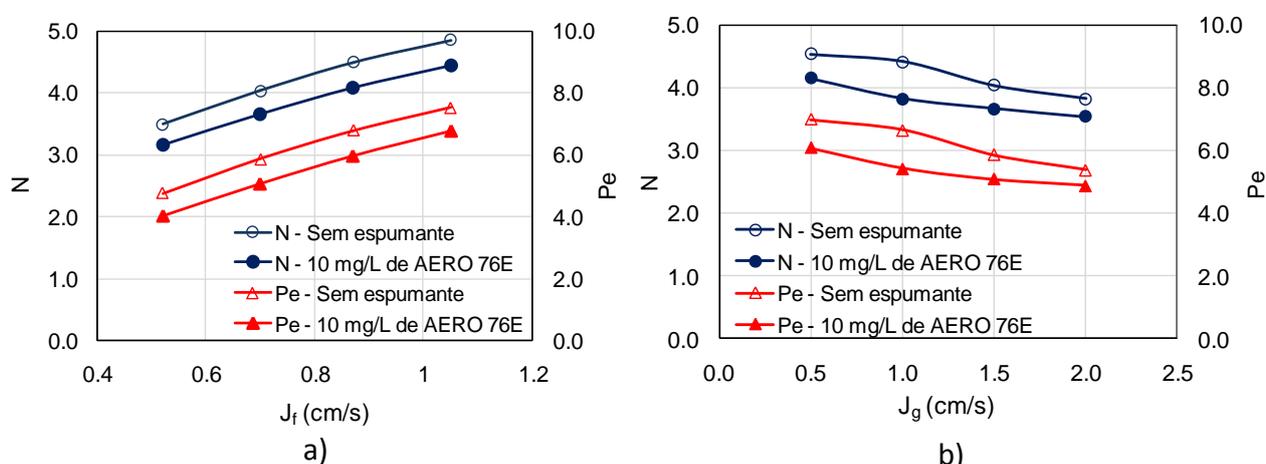


Figura 4: Número de tanques CSTR em série N e número de Pe em função da velocidade superficial de alimentação(a) e do ar (b), sem e com o espumante AERO 76E

Nas Figuras 5 (a) e (b), são apresentadas as tendências dos parâmetros fluidodinâmicos N e Pe com o aumento da velocidade superficial da água de lavagem (J_w) e da concentração de espumante (C_f), respectivamente. O aumento da velocidade superficial de água de lavagem foi realizado de duas formas: na primeira foi acompanhado de uma diminuição da velocidade superficial de alimentação (J_f variável), de forma que a velocidade superficial da corrente de rejeito (J_t) para estes ensaios fosse mantido constante (0.70 cm/s); na segunda a velocidade superficial de alimentação foi mantida constante (J_f fixa), neste caso com J_t variável. Nas duas condições, o *bias* (diferença entre a velocidade superficial do rejeito e da alimentação) para estes ensaios foi positivo e igual ao valor utilizado para a velocidade superficial de água de lavagem.

Também pode ser observado na Figura 5 (a), que não houve variação dos parâmetros hidrodinâmicos quando a vazão de rejeito foi mantida constante e J_f variável, provavelmente pelo fato da alimentação estar situado próximo da entrada de água de lavagem. Para J_f fixo e maiores velocidades superficiais de rejeito ocorreu uma diminuição da intensidade de mistura da coluna (aumento de N e Pe), provavelmente pelos mesmos motivos explicados para o aumento de J_f sem água de lavagem, conforme Figura 4 (a).

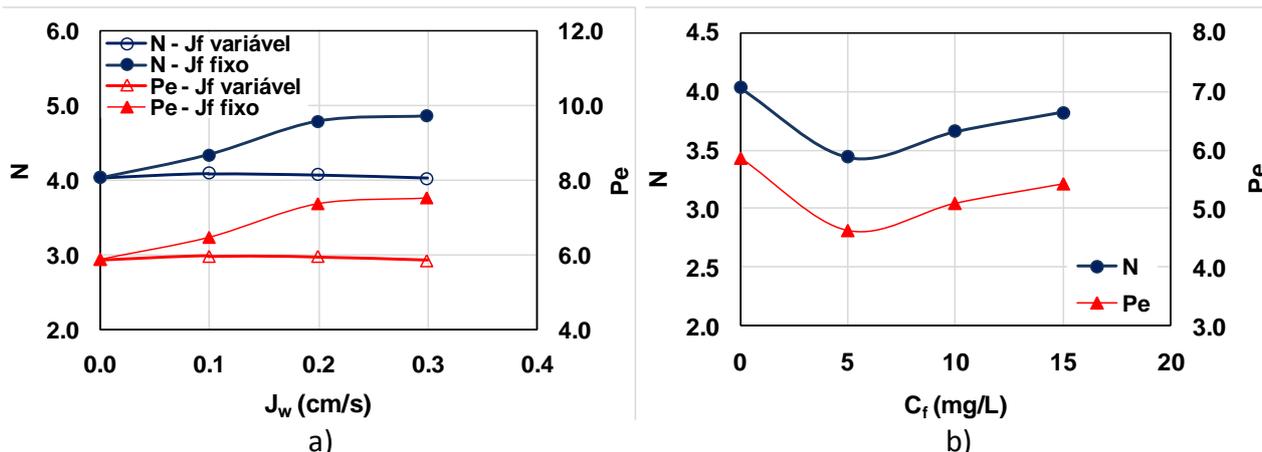


Figura 5: Parâmetros N e Pe em função da velocidade superficial de água de lavagem - J_w em (a) e da concentração de espuma - C_f em (b)

Na Figura 5 (b), o aumento da concentração de espuma levou a uma diminuição inicial de N e Pe, ou seja, maior dispersão da fase líquida na coluna, causado pelo aumento do número de bolhas (maior *hold-up*), mesmo com velocidade superficial de gás constante ($J_g = 1,5$ cm/s), conforme também observado por Shukla *et al.*, 2010. Porém, há uma inversão desta condição, a partir de 5 mg/L, levando a um aumento destes parâmetros para maiores concentrações de espuma. Isto é explicado pelo aumento de *hold-up* de ar, ocasionando um aumento da velocidade intersticial da fase líquida na direção axial, conforme observado na Figura 4 (a), ainda que a J_f utilizada tenha sido constante e igual a 0,7 cm/s. Este resultado também pode ser explicado, analisando o parâmetro Pe (razão entre a velocidade de transporte por convecção e dispersão), de forma que em baixas concentrações de espuma o maior número de bolhas provoca uma dispersão da fase líquida (menor Pe), mas em maiores concentrações de espuma o aumento da velocidade intersticial de líquido passa a ser o fator preponderante, causando um aumento no transporte por convecção (maior Pe).

Ressalta-se que o estudo de DTR avaliado para a fase líquida pode ser aplicado para a fase sólida quando esta se apresenta na forma de partículas finas, pois neste caso, as diferenças de escoamento entre estas fases são pequenas (Yianatos *et al.*, 2001). No entanto, nos estudos de DTR envolvendo polpas minerais constituídas por partículas mais grossas, ensaios específicos, utilizando traçadores adequados para fase sólida, deverão ser conduzidos para melhor resultado.

4 CONCLUSÕES

Ficou evidenciado que os modelos de dispersão axial e de tanques CSTR em série se ajustaram muito bem aos dados experimentais, com pequena vantagem para o primeiro modelo, para obtenção dos parâmetros fluidodinâmicos. Este fato pode estar relacionado com a geometria de coluna utilizada, de elevada razão comprimento/diâmetro (L/D), de escoamento *plug-flow* mais favorável, evidenciando que esta variável é de grande importância para o processo de flotação em coluna.

A técnica de DTR se mostrou muito útil e efetiva para o estudo fluidodinâmico da coluna piloto de flotação usada nos experimentos, permitindo avaliar a qualidade de mistura e o tipo de escoamento para diferentes variáveis do processo. A partir do presente estudo será possível

correlacionar os parâmetros fluidodinâmicos obtidos com dados de eficiência do processo de flotação em ensaios futuros.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Danckwerts, P. V. Continuous flow systems: distribution of residence times. *Chem. Eng. Sci.*, 1953; 2, 1-13.
2. Dobby, G.S., Finch, J.A. Mixing characteristics of industrial flotation columns. *Chem. Eng. Sci.*, 1985; 40(7).
3. Finch, J.A., Dobby G.S. *Column Flotation*, Pergamon Press, 1st Ed.; 1990.
4. Goodall, C.M.; O'Connor, C.T. Residence time distribution studies in a flotation column. Part I: The modelling of residence time distributions in a laboratory column flotation cell. *Int. J. Miner. Process.*, 1991; 31, 97-113.
5. Ityokumbul, M.T., Kosaric, N. And Bulani, W. Parameter estimation with simplified boundary conditions. *Chem. Eng. Sci.*, 1988; 43 (9), 2457-2462.
6. Levenspiel, O. Part II: Flow Patterns, Contacting, and Non-Ideal Flow, in: *Chemical Reaction Engineering*, 3thEd., John Wiley&Sons, 1999. USA, p. 257 - 366.
7. Lima, O.A., Leal Filho, L. S., Silva, A. L., Moura, A. J. Distribuição de tempos de residência da polpa em células mecânicas de flotação. *REM: Rev. Esc. Minas*, 2005, Ouro Preto, 58 (3), p. 213 - 218.
8. Mankosa, M.J., Luttrell, G.H., Adel, G.T. and Yoon, R.H. A study of axial mixing in column flotation. *Int. J. Miner. Process*, 1992; 35 (1), 51-64.
9. Mavros, P. Mixing in flotation columns. Part I: Axial dispersion modelling. *Minerals Engineering*, 1993; 6 (5), 465-478.
10. Mavros, P., Lazaridis, N.K., Matis, K.A. A Study and Modelling of Liquid-Phase Mixing in a Flotation Column. *Int. J. Miner. Process*, 1989; 26, 1-16.
11. Mavros, P.; Daniilidou, A. Mixing in flotation columns. Part II. Liquid-phase residence time distributions studies. *Minerals Engineering*, 1993; 6 (7), 707-719.
12. Santos, A.R. Estudo do Comportamento Dinâmico de Colunas de Flotação Utilizando Técnicas Nucleares. [Dissertação de Mestrado]. 134p. CDTN/CNEN, Belo Horizonte – MG, 2005.
13. Shukla, S.C., Kundu, G., Mukherjee, D. Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal. *Miner. Eng.*, 2010; 23(8), 636-642.
14. Yianatos, J., Bergh, L., Condori, P., Aguilera, J.. Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial flotation banks for control purposes. *Minerals Engineering*, 2001; 14 (9), 1033 - 1046.
15. StatSoft, Inc. *STATISTICA (data analysis software system)*, version 12, 2013.