

FLUODINÂMICA DE UMA COLUNA PILOTO DE FLOTAÇÃO: ESTUDOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA

Raphael Andrade Eloi de Oliveira

Aluno de Graduação da Engenharia Química, 3º período, UFRJ

Período PIBIC/CETEM : agosto de 2014 a julho de 2015,
raphael.eloi@gmail.com

Hudson Jean Bianchini Couto

Orientador, Eng. Químico, D.Sc. - Tecnologista Pleno

hcouto@cetem.gov.br

Abstract

This work has a pilot flotation column (10,2 cm of intern diameter and 600 cm of high) as a fluid dynamic object to evaluate, by application of residence times distribution (RTD) technich, depending on the most important variables on flotation process, such as frother dosage and superficial velocities of air, feed and wash water. It was also carried out a comparative study between the different methodologies used – as CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) in series model's adjustment and PFR (Plug-Flow Reactor) with axial dispersion – in the hydrodynamic parameters' formulation of DTR to the experimental data, with the purpose to choose the best model and apply it to the experimental results.

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

Resumo

O trabalho teve como objeto de análise fluidodinâmica uma coluna piloto de flotação (10,2 cm de diâmetro interno e 600 cm de altura), por meio da técnica de determinação de tempo de residência (DTR), em função das variáveis mais importantes do processo de flotação; sendo estas a concentração de espumante e as velocidades superficiais de alimentação, ar e água de lavagem. Além disso, foi realizado um estudo comparativo entre as diferentes metodologias empregadas - como o ajuste dos modelos CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) em série e PFR (Plug-Flow Reactor) de dispersão axial – na formulação dos parâmetros hidrodinâmicos de DTR aos dados experimentais, a fim de eleger o melhor modelo e aplicá-lo aos resultados.

Palavras chave: coluna de flotação, fluidodinâmica, distribuição de tempos de residência.

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 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).

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. O presente estudo torna-se oportuno,

diante da informação de que a ocorrência de zonas mortas ou curto-circuito é minimizada, quando a mistura das fases é efetuada de maneira adequada, oferecendo assim condições hidrodinâmicas mais apropriadas para o processo de flotação.

2. OBJETIVOS

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.

3. METODOLOGIA

3.1. Reagentes

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

3.2. 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; DOBBY, 1990).

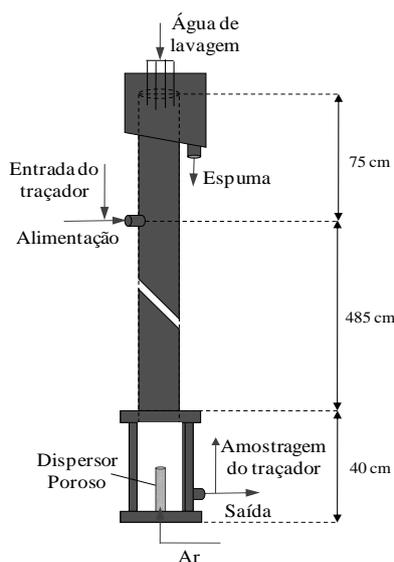


Figura 1: Coluna de flotação utilizada nos ensaios de DTR

Estabelecido o estado estacionário, o traçador é adicionado 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 (afundado) 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 rotâmetros (*Key Instruments*) e bombas peristálticas (Motor Baldor-Reliancer de 0,5 HP e cabeçote Masterflex, Modelo 77490-00) para alimentação e retirada de produtos.

3.3. 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 e a vazão volumétrica de alimentação ($\tau = V/Q_f$). 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 destes parâmetros 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 - 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.

3.3.1 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).

3.3.2 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 $E(\theta) = E(t) \cdot t_m$, obtemos a curva experimental $E(\theta)$ versus θ (LEVENSPIEL, 1999; MAVROS *et al.*, 1989).

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

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. 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 $N=1$, interpreta-se um comportamento de uma célula perfeitamente agitada.

3.3.3. 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 em 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 *Pecllet*), ou seja, $Pe < 100$ (ITYOKUMBUL *et al.*, 1988; LEVENSPIEL, 1999).

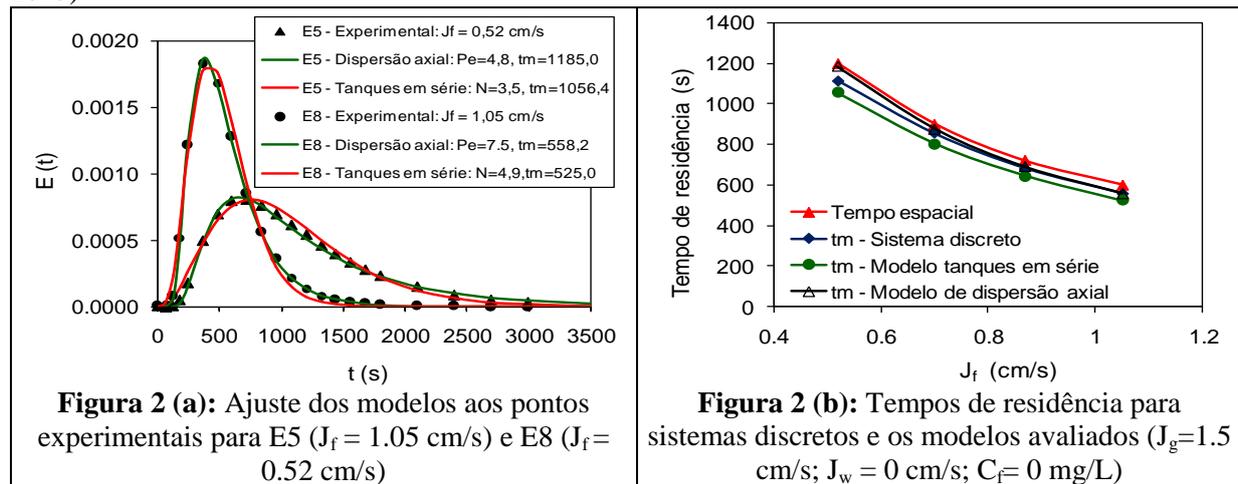
$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_m \cdot Pe}{\pi \cdot t^3}} \cdot e^{\left(-\frac{Pe \cdot (t_m - t)^2}{4 \cdot t \cdot t_m} \right)} \quad (2)$$

4. 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 flotação em coluna). 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. Na Figura 2 (a) são

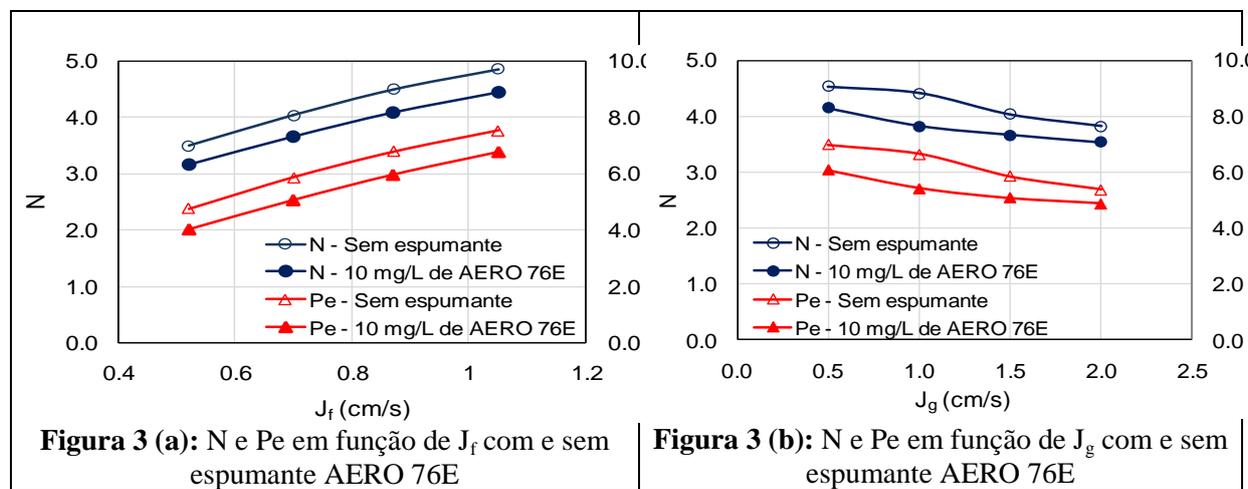
apresentados os ajustes dos modelos avaliados aos dados experimentais para dois ensaios: E5 com $J_f = 0,52$ cm/s e E8 com $J_f = 1,05$ cm/s. Na Figura 2 (b) são apresentados os resultados dos tempos de residências na faixa de J_f avaliada.

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. O uso dos parâmetros t_m e N por sistemas discretos auxilia na análise, já que servem de 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).



As estimativas dos parâmetros para os dois modelos fluidodinâmicos foram realizadas com sucesso, com pequena vantagem para o modelo de dispersão axial, principalmente nos extremos das curvas, regiões de subida e descida (calda) da função, seja pela análise do gráfico, seja pelos valores de R^2 encontrados (entre 0,98 e 0,99 para o modelo de tanques em série e acima de 0,99 para o modelo de dispersão axial). Embora já tenha sido relatado na literatura que a condição de contorno *open-open* para o modelo de dispersão axial deva ser utilizada 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 (entre 4 e 8). Da Figura 2 (b) é possível observar que houve uma diminuição no tempo de residência médio com o aumento de J_f , conforme esperado.

Nas Figuras 3 (a) e 3 (b) são apresentados os resultados dos parâmetros N e Pe em função da velocidade superficial de alimentação e de ar, respectivamente, com e sem o espumante AERO 76E.



Os 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. O mais aceito na literatura é que o aumento na velocidade superficial de alimentação causa menor perturbação no fluxo de gás ascendente e, conseqüentemente, uma diminuição da turbulência na coluna (SHUKLA *et al.*, 2010). A presença do espumante AERO 76E levou a uma diminuição de N e Pe, conforme observado na Figura 3 (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 3 (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 (GOODALL; O'CONNOR, 1991; MAVROS; DANILIDOU, 1993; 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. A influência das variáveis velocidade superficial de água de lavagem e concentração de espumante também foram avaliadas mas os resultados não serão apresentados aqui por limitação de espaço.

5. CONCLUSÕES

A técnica de DTR se mostrou muito útil e efetiva, permitindo avaliar a qualidade de mistura e o tipo de escoamento. 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, na 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 a importância desta no processo de flotação em coluna.

6. AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos grandes colaboradores na pesquisa: ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, ao pesquisador Hudson J. B. Couto pela orientação e oportunidade de participação no projeto e ao CETEM pelos ambientes e instrumentos oferecidos, sem os quais não seria possível a realização do estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DANCKWERTS, P. V. Continuous flow systems: distribution of residence times. **Chem. Eng. Sci.**, v.2, p.1-13, 1953.
- FINCH, J.A., DOBBY G.S. **Column Flotation**, Pergamon Press, 1st Ed.; 1990.
- 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.**, v.31, p.97-113, 1991.
- ITYOKUMBUL, M.T., KOSARIC, N. AND BULANI, W. Parameter estimation with simplified boundary conditions. **Chem. Eng. Sci.**, v.43, n.9, p.2457-2462, 1988.
- LEVENSPIEL, O. Part II: Flow Patterns, Contacting, and Non-Ideal Flow, In: Chemical Reaction Engineering. 3th Ed., John Wiley&Sons, USA, 1999, p. 257 - 366.
- 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. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v.58, n.3, p. 213 - 218, 2005.
- 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.**, v.35, n.1, p.51-64, 1992.
- MAVROS, P.; DANILIDOU, A. Mixing in flotation columns. Part II. Liquid-phase residence time distributions studies. **Miner. Eng.**, v.6, n.7, p.707-719, 1993.
- SANTOS, A.R. **Estudo do Comportamento Dinâmico de Colunas de Flotação Utilizando Técnicas Nucleares**. 2005. 134p. Dissertação (Mestrado) - CDTN/CNEN, Belo Horizonte – MG (Brasil).
- SHUKLA, S.C., KUNDU, G., MUKHERJEE, D. Study of gas hold-up and pressure characteristics in a column flotation cell using coal. **Miner. Eng.**, v.23, n.8, p.636-642, 2010.