

# A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE COLUNAS PILOTO DE FLOTAÇÃO NA FLUIDODINÂMICA DO PROCESSO

**Raphael Andrade Eloi De Oliveira**

Aluno de Graduação da Engenharia Química, 5º período, UFRJ.  
Período PIBIC/CETEM: agosto de 2015 de início a julho de 2016,

[raphael.eloi@gmail.com](mailto:raphael.eloi@gmail.com)

**Hudson Jean Bianchini Couto**

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

[hcouto@cetem.gov.br](mailto:hcouto@cetem.gov.br)

## Resumo

O presente estudo teve como objetivo principal caracterizar o comportamento fluidodinâmico de duas colunas piloto de flotação (10,2 e 15,2 cm de diâmetro, ambas com 6 m de altura), utilizando a técnica de DTR para avaliar as variáveis mais importantes no processo de flotação, tais como: a dosagem de espumante, a velocidade superficial de alimentação, a de ar e a de água de lavagem. Os dados obtidos foram submetidos aos modelos clássicos: o CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) em série e o PFR (Plug-Flow Reactor) com dispersão axial. Isso possibilitou determinar os parâmetros hidrodinâmicos e eleger o modelo mais adequado para aplicar em tais sistemas.

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

## THE ROLE OF FLOTATION COLUMNS DIAMETER ON FLUID DYNAMIC PROCESS

### Abstract

The current work aimed to describe the fluid dynamics behavior in two pilot columns flotation (10,2 e 15,2 cm of intern diameter, both with 6 m of high), by using the RTD technique to evaluate the most important variables on the flotation process, such as the froth dosage, the superficial velocities of feed, of air and of wash water. The obtained data were submitted to two classic models: the CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) in series and the PFR (Plug-Flow Reactor) with axial dispersion. This permits to determine the hydrodynamics parameters and select the most appropriate model to apply in these systems.

**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 quantificar os desvios ao comportamento ideal (Danckwerts, 1953). A análise da DTR constitui em um instrumento valioso para estimar a qualidade da mistura em equipamentos, incluindo células de flotação. A técnica consiste em adicionar um elemento traçador (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. OBJETIVO

Avaliar o comportamento fluidodinâmico de colunas de flotação dotadas de diferentes diâmetros (10,2 e 15,2 cm), por meio da técnica de DTR da fase líquida e da análise dos parâmetros

hidrodinâmicos (estimados pelos modelos CSTR em série e PFR com dispersão axial) em função de variáveis-chave do processo.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Reagentes

Soluções de 1 mol/L de Cloreto de potássio P.A. (KCl, 74,5 g/mol) - SIGMA ALDRICH® (traçador químico da fase líquida); AERO 76E (mistura de álcoois), da Cytec Industries, e Flotanol D14 (metil etil de polipropileno glicol), da Clariant, foram usados como agentes espumantes.

#### 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). Estabelecido o estado estacionário, o traçador é adicionado na alimentação da coluna (perturbação por impulso) e simultaneamente um cronômetro é acionado.

Em intervalos de tempos predeterminados, amostras são recolhidas no fluxo de saída (afundado) para avaliação da concentração do traçador (KCl) com o tempo, utilizando medidas correspondentes de condutividade elétrica (Lutron, WA-2015). Os experimentos foram realizados em duas colunas piloto de flotação, com 10,2 e 15,2 cm de diâmetro interno e 6 m de altura, construídas em PVC transparente e fabricadas pela *Eriez Minerals Flotation Group* (Canadá). O aparato é constituído ainda por um sistema de controle de nível, de vazão de água de lavagem e de ar por meio de rotâmetros (*Key Instruments*), além de bombas peristálticas (Motor Baldor-Reliancer de 0,5 HP e cabeçote Masterflex, Modelo 77490-00).

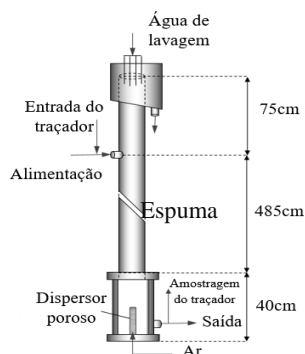


Figura 1: Modelo das colunas utilizadas nos ensaios de DTR

#### 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 ( $\tau$ ) 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/mistura das fases e a análise de DTR leva à obtenção do tempo de residência médio ( $t_m$ ), que pode diferir muito do tempo de residência nominal ( $\tau$ ). Assim, 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 elementos do fluido atravessam o sistema muito mais rapidamente que outros) e se " $t_m < \tau$ " indica a presença de zonas mortas ou de estagnação.

##### 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 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 ( $\sigma_t^2$ ) e o número de tanques em série ( $N$ ) para sistemas discretos 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  $E(\theta)=E(t)*t_m$ , obtemos a curva experimental  $E(\theta)$  versus  $\theta$  (Levenspiel, 1999; Mavros *et al.*, 1989).

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

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.

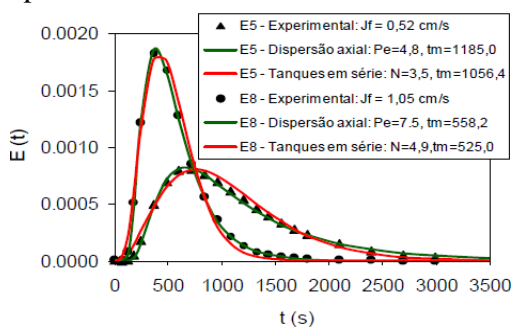
### 3.3.3. Modelo de dispersão axial

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 *Peclet*), ou seja,  $Pe < 100$  (Ityokumbul *et al.*, 1988; Levenspiel, 1999).

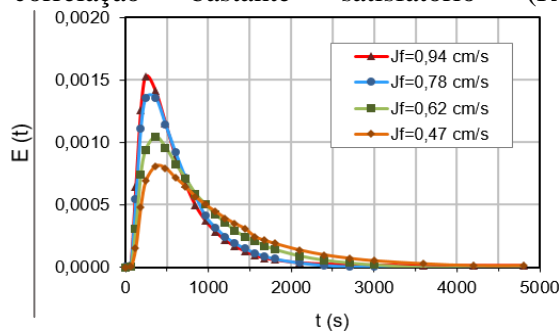
$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_m \cdot Pe}{\pi \cdot t^3}} \cdot e^{-\left(\frac{Pe \cdot (t_m - t)^2}{4 \cdot t \cdot t_m}\right)} \quad (2)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para aplicar a técnica de DTR, é necessária a utilização de um marcador (KCl) que permita avaliar o escoamento dentro do equipamento. A condutividade foi o parâmetro adotado para caracterizar a concentração do sal na saída, sendo esta medida em intervalos de tempo determinados. A curva de calibração que relaciona a condutividade com a concentração do sal apresentou um coeficiente de correlação bastante satisfatório ( $R^2=0,999$ ).



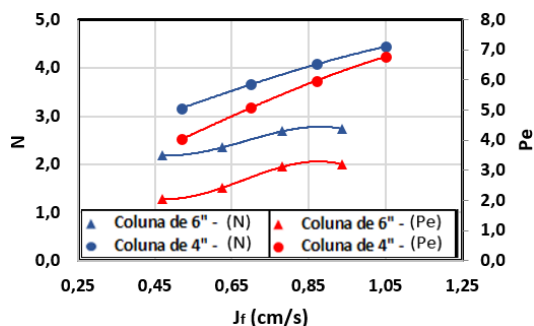
**Figura 2:** Comportamento experimental da função  $E(t)$  para diferentes valores de  $J_f$



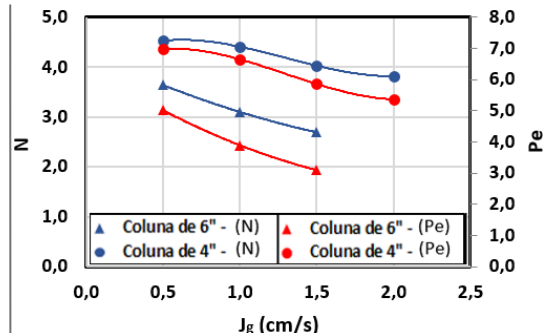
**Figura 3:** Ajuste dos modelos aos pontos experimentais de E5 e E8 da coluna de 10,2cm

Na Figura 2, é apresentado o comportamento da função  $E(t)$  para diferentes velocidades superficiais analisadas na coluna de 15,2 cm. Observa-se que quanto maior o valor de  $J_f$ , mais intenso é o máximo da função  $E(t)$  e mais afunilada é a curva. Isso indica maior aproximação das características de um reator contínuo perfeitamente agitado. Já na Figura 3, são apresentados os ajustes dos modelos (CSTR em série e PFR com dispersão axial) aos pontos experimentais para os ensaios E5 ( $J_f = 0.52 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e E8 ( $J_f = 1.05 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) realizados na coluna de 10,2 cm.

Os parâmetros hidrodinâmicos foram analisados para cada uma das colunas (em diferentes condições) utilizando os modelos discretos, assim como os de CSTR e de PFR, por meio das Equações 1 e 2 respectivamente. Os parâmetros foram avaliados em duas condições: com e sem utilização de espumante (AERO 76E/Flotanol D14). A utilização dos parâmetros  $t_m$  e  $N$  obtidos por sistemas discretos como valores iniciais implica em uma maior velocidade de convergência (menor número de iterações). A regressão não-linear teve como base o método dos mínimos quadrados e foi realizada com o software *Statistica 12* (StatSoft, Inc., 2013).

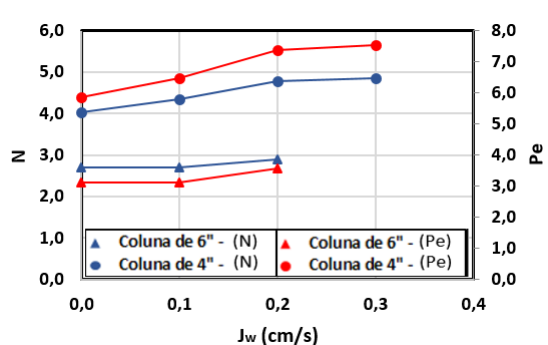


**Figura 4:** N e Pe em função de  $J_f$  com e sem espumante para ambas as colunas

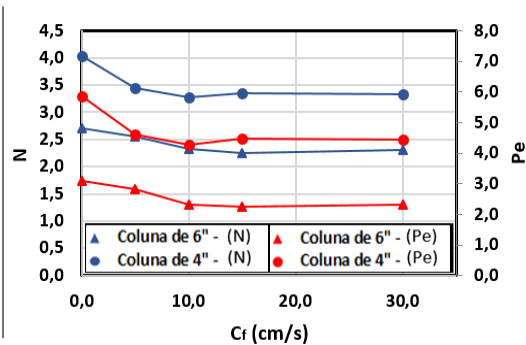


**Figura 5:** N e Pe em função de  $J_g$  com e sem espumante para ambas as colunas

Na Figura 4, observa-se que quanto maior a velocidade superficial de alimentação ( $J_f$ ), menor é a intensidade de mistura (N e Pe maiores). Isso pode ser justificado pelo fato de que um aumento na  $J_f$  induz uma menor perturbação no fluxo ascendente de ar e, conseqüentemente, menor turbulência (Shukla *et al.*, 2010). Pela Figura 5, é notável que o aumento da velocidade superficial de ar ( $J_g$ ) provocou um aumento da intensidade de mistura da fase líquida na coluna (menores valores de N e Pe), conforme observado por outros autores (Goodall; O'Connor, 1991; Mavros & Danilidou, 1993; Shukla *et al.*, 2010). Isso é uma consequência do aumento do número de bolhas por unidade de volume – maior turbulência.



**Figura 6:** N e Pe em função de  $J_w$  para ambas as colunas



**Figura 7:** N e Pe em função de  $C_f$  para ambas as colunas

A velocidade superficial de água de lavagem ( $J_w$ ) apresentou comportamento bastante similar àquele observado na variação da velocidade superficial de alimentação ( $J_f$ ), conforme observado na Figura 6. Tal similaridade já era esperada, uma vez que a água de lavagem só ganha relevância no arraste de partículas hidrofílicas da espuma para a zona de coleta em um sistema trifásico (partículas sólidas/água/bolhas de ar). Na análise aqui realizada, a água de lavagem somente funciona como segunda fonte de vazão de alimentação. Como ilustrado na Figura 7, a concentração de espumante ( $C_f$ ) também foi avaliada e foi verificado o aumento da intensidade de mistura (N e Pe menores) com o aumento da concentração de espumante. Tal comportamento pode ser explicado pelo papel dos espumantes em diminuir a tensão superficial, dificultando assim a coalescência e, conseqüentemente, aumentando o número de bolhas (menores).

De maneira geral, foi observado que, para todas as variáveis avaliadas, a coluna de maior diâmetro (15,2 cm ou 6 in) apresentou maior mistura da fase líquida, fato constatado pelos

menores valores de  $N$  e  $Pe$  nas mesmas faixas de trabalho. Uma observação similar foi obtida por Mavros & Danilidou (1993), na análise de  $J_f$ , ao avaliar colunas de bancada com diferentes diâmetros.

Houve sucesso na estimativa dos parâmetros em ambos os modelos e para ambas as colunas, com pequena vantagem para o PFR, principalmente nas regiões de subida e descida (calda) da função, seja pela análise do gráfico, seja pelos valores de  $R^2$  encontrados (entre 0,91 e 0,99 para o modelo de tanques em série e acima de 0,98 para o modelo de dispersão axial), seja pela análise gráfica. 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 & Danilidou, 1993), foi possível obter bons ajustes ( $R^2$  acima de 0,99) para valores de  $Pe$  abaixo deste valor (entre 4 e 8). Foi notada uma maior discrepância entre os modelos quando analisada a coluna de 15,2 cm, já que os valores de  $R^2$  apresentados para esta coluna com o modelo de CSTR em série distaram mais do PFR com dispersão axial do que para a coluna de 10,2 cm.

## 5. CONCLUSÕES

A técnica de DTR se mostrou muito útil e efetiva, permitindo avaliar a qualidade de mistura e o tipo de escoamento. Para todas as variáveis avaliadas, a coluna de maior diâmetro (15,2 cm) apresentou maior dispersão, mistura da fase líquida, fato constatado pelos menores valores de  $N$  e  $Pe$ . 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 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.**; 2, 1-13, 1953.
- FINCH, J.A., DOBBY G.S. **Column Flotation**, Pergamon Press, 1<sup>st</sup> 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.**; 31, 97-113, 1991.
- ITYOKUMBUL, M.T., KOSARIC, N. AND BULANI, W. Parameter estimation with simplified boundary conditions. **Chem. Eng. Sci.**; 43 (9), 2457-2462, 1988.
- LEVENSPIEL, O. Part II: Flow Patterns, Contacting, and Non-Ideal Flow, In: Chemical Reaction Engineering, 3<sup>th</sup> 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, 58 (3), p. 213 - 218, 2005.
- MAVROS, P.; DANILIDOU, A. Mixing in flotation columns. Part II. Liquid-phase residence time distributions studies. **Miner. Eng.**; 6 (7), 707-719, 1993.
- 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.**; 35 (1), 51-64, 1992.
- 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.**; 23(8), 636-642, 2010.