

Série Tecnologia Mineral

Análise fluidodinâmica das colunas piloto de flotação do CETEM por meio de distribuição de tempos de residência - DTR

Hudson Jean Bianchini Couto

Renata Nigri de Almeida

Raphael Andrade Eloi de Oliveira

Paulo Fernando Almeida Braga

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

**Análise fluidodinâmica das colunas piloto de flotação
do CETEM por meio de distribuição de tempos de
residência – DTR**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Gilberto Kassab

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário-Executivo

Gustavo Zarif Frayha

Diretor de Gestão das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

Isabela Sbampato Batista de Paula

Coordenadora-Geral das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Durval Costa Reis

Coordenador de Administração- COADM

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador do Núcleo Regional do Espírito Santo - CONES

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

ISBN 978-85-8261-091-6

STM - 100

Análise fluidodinâmica das colunas piloto de flotação do CETEM por meio de distribuição de tempos de residência – DTR

Hudson Jean Bianchini Couto

Eng. Químico, D.Sc

Tecnologista Pleno do CETEM/MCTIC

Renata Nigri de Almeida

Eng. Química pela UFRJ

Bolsista PCI do CETEM/MCTIC

Raphael Andrade Eloi de Oliveira

Aluno de Graduação em Eng. Química pela UFRJ

Paulo Fernando Almeida Braga

Eng. Químico, D.Sc

Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

CETEM/MCTIC

2018

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

Marisa Bezerra de Mello Monte

Editora

Claudio Luiz Schneider

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Arnaldo Alcover Neto (CETEM), Fernando A. Freitas Lins (CETEM), Regina Coeli C. Carrisso, (CETEM), Reiner Neumann (CETEM), Ronaldo Luiz C. dos Santos (CETEM), Achilles Junqueira B. Dutra (UFRJ), Antonio E. Clark Peres (UFMG), José Aury de Aquino (CDTN), José Farias de Oliveira (UFRJ), Lino R. de Freitas (VALE), Luciano Tadeu da S. Ramos (Consultor), Mário Rui M. Leite (LNEG-PORTUGAL) e Maurício L. Torem (PUC-Rio).

A Série Tecnologia Mineral publica trabalhos na área minerometalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

Hudson Jean Bianquini Couto

Revisão

Ana Maria Silva Vieira de Sá

CRB7 3982

Catálogo na Fonte

Couto, Hudson Jean Bianquini

Análise fluidodinâmica das colunas piloto de flotação do CETEM por meio de distribuição de tempos de residência – DTR / Hudson Jean Bianquini Couto [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

50p.: il. – (Série Tecnologia Mineral, 100)

1. Flotação em coluna. 2. Fluidodinâmica. 3. DTR. I. Almeida, Renata Nigri de. II. Oliveira, Raphael Andrade Eloi de. III. Braga, Paulo Fernando Almeida. IV. Centro de Tecnologia Mineral. V. Título. VI. Série.

CDD – 622-752

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| RESUMO | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 Flotação | 9 |
| 1.2 Principais Variáveis da Coluna de Flotação | 12 |
| 1.3 Distribuição de Tempos de Residência - DTR | 14 |
| 2 OBJETIVO | 16 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 17 |
| 3.1 Materiais | 17 |
| 3.2 Determinação Experimental da DTR | 17 |
| 3.3 DTR da Fase Líquida na Coluna de Flotação | 19 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 23 |
| 5 CONCLUSÕES | 44 |
| 6 AGRADECIMENTOS | 45 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |

RESUMO

A flotação é um processo físico-químico utilizado no beneficiamento de minérios com o objetivo de promover a separação entre os minerais de interesse. Este trabalho teve como objetivo avaliar a fluidodinâmica das colunas de flotação do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, por meio da aplicação da técnica de Distribuição de Tempos de Residência – DTR. Três colunas piloto de 2”, 4” e 6” de diâmetro (5,1, 10,2 e 15,2 cm de diâmetro, ambas com 600 cm de altura) foram avaliadas em função de variáveis mais importantes do processo de flotação como: dosagem de espumante, velocidade superficial de alimentação, de ar e de água de lavagem, entre outras. Os resultados obtidos foram submetidos aos modelos clássicos de CSTR (*Continuous Stirred-Tank Reactor*) em série e PFR (*Plug-Flow Reactor*) com dispersão axial, com o objetivo de determinar os parâmetros hidrodinâmicos de DTR e eleger o modelo mais adequado para ser aplicado.

Palavras-chave

Coluna de flotação, fluidodinâmica, distribuição de tempos de residência.

ABSTRACT

Flotation is a physico-chemical process used in mineral processing aiming to separate minerals of interest. The aim of this work was to evaluate the fluid dynamics of the flotation columns from CETEM - Centre for Mineral Technology, by applying the Residence Time Distribution - RTD technique. A fluid dynamics study in three flotation columns (2", 4" and 6" diameter) was performed from residence time distribution (RTD) measurements, considering the most important variables on the flotation process, such as: frother concentration, superficial air, feed and water washing velocities, among others. The obtained data were fitted to the classical models: CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) in series and PFR (Plug-Flow Reactor) with axial dispersion, aiming to determine the hydrodynamic parameters from RTD analysis and to help in choosing the most suitable model to be applied.

Keywords

Column flotation, fluid dynamics, residence time distribution.

1 | INTRODUÇÃO

1.1 | Flotação

A flotação é um processo físico-químico utilizado no beneficiamento de minérios com o objetivo de promover a separação entre os minerais de interesse. Nesse processo, bolhas de ar são injetadas e/ou formadas no interior da célula de flotação. Assim, as partículas hidrofóbicas (aversão à água) se aderem à superfície das bolhas formando agregados bolha-partículas que ascendem (flotam), formando uma fase de espuma coletada no topo do equipamento. As partículas hidrofílicas (afinidade pela água) permanecem em suspensão aquosa e são removidas na base do equipamento, geralmente como rejeito, no caso de flotação direta, constituindo o produto dito afundado.

O processo de flotação foi desenvolvido no início do século XX e é um dos processos industriais mais utilizados na concentração mineral pois possibilita o aproveitamento de minérios complexos e de baixos teores de forma econômica e com bons rendimentos metalúrgicos (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982).

As colunas de flotação surgiram da necessidade de resolver os problemas de grandes perdas de partículas finas, perdidas na corrente de descarte de circuitos de flotação em células mecânicas convencionais. O principal motivo para essas perdas é que os equipamentos de flotação convencional geram bolhas com diâmetros entre 600-3000 μm , consideradas relativamente grandes para separação de partículas finas, inconveniente do processo que foi atenuado com a criação das colunas de flotação.

Dentre as vantagens da coluna de flotação em relação à célula mecânica, pode-se citar: a geometria da coluna, relação altura (H)/diâmetro (D), sendo que para uma maior relação H/D, aumenta

probabilidade de contato bolha-partícula; capacidade de flotar partículas menores que as células convencionais, em função do sistema de geração de bolhas por meio de um aerador poroso; e maior seletividade pela aplicação de água de lavagem diminuindo o arraste hidrodinâmico de partículas hidrofílicas para a espuma.

A flotação em coluna possui um maior rendimento no processamento de minérios de granulometria mais fina, principalmente em função do melhor controle de tamanho das bolhas geradas e da adição de água de lavagem, diminuindo o arraste hidráulico de partículas hidrofílicas na espuma (DOBBY e FINCH, 1985; SANTOS, 2005).

Em uma coluna de flotação são identificadas duas regiões distintas:

zona de coleta ou recuperação, situada entre a entrada de ar e a interface polpa-espuma, onde ocorre o processo de coleta das partículas hidrofóbicas;

zona de limpeza, também conhecida como zona de espuma, situada da interface polpa-espuma até a descarga do concentrado (FINCH e DOBBY, 1990).

A Figura 1 apresenta um esquema básico de uma coluna de flotação.

Normalmente, as colunas de flotação industriais são operadas sob determinadas condições operacionais preestabelecidas por meio de trabalhos realizados em colunas piloto, tais como: vazão de ar, *hold up* do ar (fração volumétrica de ar na coluna), vazão de alimentação, porcentagem de sólidos, dosagem de reagentes, tempo médio de residência, tamanho de bolha, dentre outros. Segundo MAVROS (1993) e SANTOS (2005), a condição de mistura em que se encontram as fases líquida (água do processo), sólida (partículas minerais) e gasosa (bolhas de ar) na zona de coleta de uma coluna de flotação é um fator preponderante para a recuperação do processo. Nesse contexto, conhecendo a distribuição e o tempo médio de

residência das fases presentes e a distribuição do tamanho de bolha é possível quantificar o efeito da dispersão da coluna e correlacionar com a recuperação do processo (SANTOS, 2005).

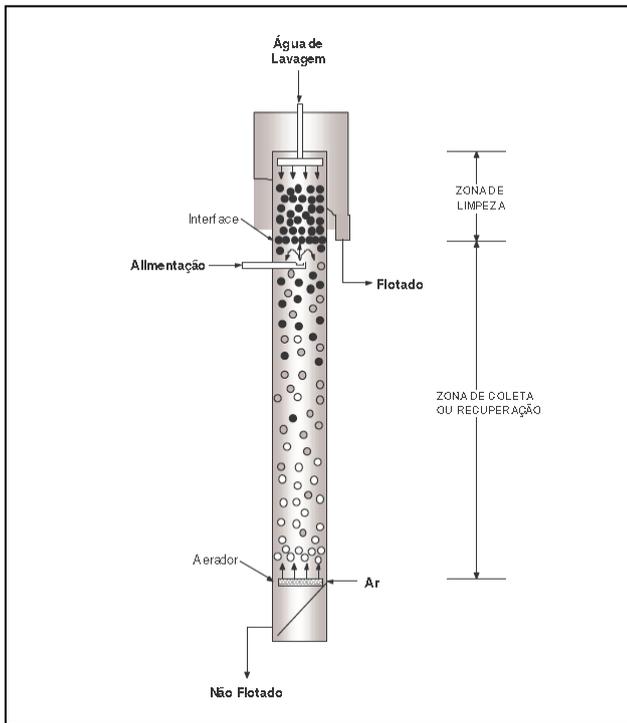


Figura 1. Esquema básico de uma coluna de flotação.

Em diversos processos, a exemplo da flotação, os equipamentos utilizados funcionam de modo contínuo, onde há pelo menos uma entrada e uma saída através das quais é transportada matéria e/ou energia, sendo estes processos designados por sistemas abertos. No projeto de equipamentos contínuos o escoamento é muitas vezes considerado como ideal: perfeitamente agitado ou do tipo pistão (FOGLER, 1992; LEVENSPIEL, 1999), entretanto, o escoamento

através dos equipamentos nem sempre segue padrões ideais, o que pode interferir no desempenho dos sistemas de uma forma geral, levando a obtenção de respostas abaixo do esperado.

1.2 | Principais Variáveis da Coluna de Flotação

O processo de flotação em coluna é influenciado por um grande número de variáveis, que podem ter efeito significativo sobre o teor e/ou recuperação do mineral de interesse. As principais variáveis que influenciam o processo de flotação serão descritas a seguir.

Velocidade superficial de ar (J_g)

Definida pela relação entre a vazão de ar (Q_g) e a área transversal da coluna (A_c), situando-se na faixa entre 1 e 3 cm/s em condições normais de operação [Equação 1].

$$J_g = \frac{Q_g}{A_c} \quad [1]$$

Hold up do ar (ϵ_g)

Corresponde à fração volumétrica que o ar ocupa na zona de coleta da coluna. Esse parâmetro depende da vazão de ar, do tamanho de bolhas, da densidade de polpa, do carregamento de sólidos nas bolhas e da velocidade descendente de polpa (AQUINO et al., 2010).

Tamanho de bolhas

O tamanho médio e a distribuição das bolhas de ar tem um efeito direto na eficiência da coleta e no transporte das partículas para a zona de limpeza. Bolhas pequenas apresentam maior área superficial por volume de ar, acarretando uma cinética de coleta e de transporte de sólidos mais elevada. No entanto, bolhas muito reduzidas podem apresentar uma velocidade de ascensão inferior à velocidade

descendente de polpa, acarretando assim perdas de partículas hidrofóbicas coletadas. O tamanho médio de bolhas está situado na faixa de 0,5 a 2,0 mm em condições normais de operação (AQUINO et al., 2010).

Bias

Representa a fração residual da água de lavagem que flui através da coluna, sendo o principal responsável pela ação de limpeza na espuma (rejeição de partículas hidraulicamente arrastadas) (AQUINO et al., 2010).

Água de lavagem

Uma das vantagens da coluna de flotação em relação às células mecânicas é a introdução da água de lavagem adicionada no topo da coluna, que tem como principais funções, segundo AQUINO et al. (2010) e SANTOS (2005):

- substituir a água de alimentação na fração flotada, minimizando o arraste hidráulico de partículas hidrofílicas;
- aumentar a altura e a estabilidade da camada de espuma;
- reduzir a coalescência das bolhas através da formação de um leito de bolhas empacotadas.

Altura da camada de espuma

Geralmente, a altura da camada de espuma em uma coluna de flotação varia entre 0,5 a 1,5 m (escala industrial) e entre 0,4 e 1,0 m (escala piloto). Uma altura maior na camada de espuma melhora a seletividade no processo de flotação, já uma altura menor da camada de espuma evita o arraste hidráulico de partículas finas (MAZON, 2006).

Tempo de residência

Corresponde ao tempo de permanência da polpa dentro da célula de flotação. É uma das variáveis que alteram tanto o teor como a recuperação do material flotado, atuando mais significativamente na recuperação. Variações no tempo de residência podem ser efetuadas por meio de alterações na taxa e na concentração de sólidos da alimentação, na vazão da água de lavagem, no *hold up* do ar e na altura da zona de recuperação da coluna (AQUINO et al., 2010).

1.3 | Distribuição de Tempos de Residência - DTR

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 (ZWIETERING, 1959). A análise da DTR constitui em um instrumento útil e valioso para estimar a qualidade da mistura que ocorre dentro de equipamentos, incluindo células de flotação. A técnica consiste em adicionar um elemento traçador ou marcador como corantes, sais inorgânicos, elementos ativados, radioativos, etc., na entrada das células ou dos equipamentos, normalmente na forma de pulso, e analisar a concentração deste traçador na saída, conforme Figura 2 (LIMA et al., 2005).



Figura 2. Esquema do aparato de estímulo/resposta utilizado para obtenção da DTR.

De acordo com SHUKLA et al. (2010), MAVROS (1993) e SANTOS (2005), a condição de mistura em que se encontram as fases líquidas, sólida e gasosa na zona de coleta de uma coluna de flotação é um fator preponderante para a recuperação do processo. Segundo estes autores, quanto menor a turbulência na zona de coleta, melhor o desempenho da coluna, justificado como sendo um dos principais fatores que afeta a coleta devido ao desprendimento da partícula mineral coletada por outras bolhas. Quando a mistura das fases é efetuada de maneira adequada, a ocorrência de zonas mortas ou curto-circuito é minimizado, oferecendo condições hidrodinâmicas mais apropriadas para um 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*).

2 | OBJETIVO

O objetivo geral desse estudo foi avaliar a fluidodinâmica das colunas piloto de flotação do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM (5,1, 10,2 e 15,2 cm de diâmetro, todas com 600 cm de altura), por meio da aplicação da técnica de Distribuição de Tempos de Residência – DTR da fase líquida, em função das variáveis chaves do processo de flotação como: velocidade superficial da alimentação, do ar e da água de lavagem e concentração de espumante. Foi realizado um estudo comparativo entre diferentes metodologias utilizadas para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de DTR: aproximação por sistemas discretos (somatórios) e ajuste não linear dos modelos CSTR em série e PFR com dispersão axial aos dados experimentais.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 | Materiais

Azul de metileno e cloreto de potássio P.A. (KCl, 74,55 g/mol) em soluções de 1 mol/L, da SIGMA ALDRICH®, foram utilizados como traçadores químicos da fase líquida (132 mL para a coluna de 2" e 256 mL para as colunas de 4" e 6"). Flotanol D25 (polipropileno glicol) da Clariant Mining Solutions, AEROFROTH 76E (mistura de alcoóis) da Cytec Industries Inc., e Flotanol D14 (polipropileno glicol) da Clariant Mining Solutions, foram utilizados como agentes espumantes.

3.2 | Determinação Experimental da DTR

A determinação da DTR consiste em operar a coluna continuamente com vazões de ar e água previamente conhecidas, conforme condições recomendadas na literatura (AQUINO et al., 2010; FINCH e DOBBY, 1990). Estabelecidas as condições desejadas, uma quantidade de traçador é adicionada instantaneamente na alimentação da coluna (perturbação pulso) 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. As medidas de condutividade foram obtidas com os condutivímetros MS Tecnoyon (modelo mCA-150) ou Lutron, WA-2015. Os experimentos foram realizados nas colunas piloto de flotação do CETEM, com 2", 4" e 6" de diâmetro interno e 600 cm de altura, construídas em PVC transparente, com volumes totais de aproximadamente 13 L, 50 L e 109 L para as colunas de 2", 4" e 6" respectivamente, fabricada pela *Eriez Minerals Flotation Group - Canada, Inc.* (Figura 3). O aparato experimental 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.

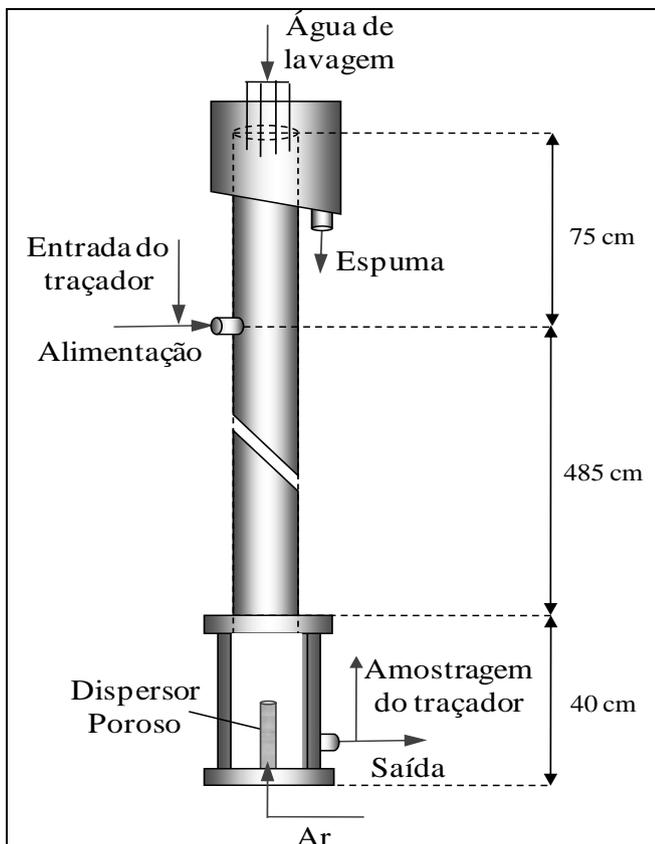


Figura 3. Coluna de flotação utilizada nos ensaios de DTR.

3.3 | DTR da Fase Líquida na Coluna de Flotação

No dimensionamento de sistemas contínuos, a exemplo das células de flotação, é prática a utilização do tempo de residência nominal ou tempo espacial (τ) da polpa no sistema, definido pela Equação [2]:

$$\tau = \frac{V}{Q_f} \quad [2]$$

onde V é o volume da coluna e Q_f é a vazão volumétrica de alimentação.

Em geral as células de flotação possuem um determinado nível de agitação e mistura das fases, cuja análise de DTR leva a obtenção do tempo de residência médio (t_m), que pode diferir muito do tempo de residência nominal (τ). Apenas para uma situação ideal em que o equipamento é perfeitamente agitado, estes tempos são iguais ($t_m = \tau$). Portanto, a comparação do tempo de residência médio com o tempo de residência nominal no sistema permite verificar se o escoamento é ideal (quando $t_m = \tau$), ou identificar o tipo de desvio ao escoamento ideal. Se $t_m > \tau$ há predominância de curto-circuito, caracterizado por elementos de fluido atravessarem o sistema muito mais rapidamente que os outros, e se $t_m < \tau$ indica a formação de zonas mortas ou estagnadas no equipamento.

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 pulso, 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 e sua variância -

σ_t^2 são dados pelas Equações [3], [4] e [5] (FOGLER, 1992; MELO, 2002). A variância da distribuição, σ^2 , permite conhecer a dispersão da distribuição em torno do seu valor médio.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \cong \frac{C(t)}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad [3]$$

$$t_m = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt \cong \sum_i t_i \cdot E(t_i) \cdot \Delta t_i \quad [4]$$

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot E(t) \cdot dt - t_m^2 \cong \sum_i t_i^2 \cdot E(t_i) \cdot \Delta t_i - t_m^2 \quad [5]$$

Estes parâmetros são determinados experimentalmente através da medida da concentração de um traçador em função do tempo, a partir de um pulso na alimentação.

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 [6], enquanto que o número de tanques em série é calculado pela Equação [7] (LEVENSPIEL, 1999). 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 , assim o modelo CSTR (reator perfeitamente agitado ou *Continuous Stirred-Tank Reactor*) em série, em variáveis adimensionais, toma a forma apresentada na Equação [8] (LEVENSPIEL, 1999; MAVROS et al., 1989).

$$E(t) = \frac{t^{(N-1)}}{t_m^N \cdot (N-1)!} \cdot e^{-\frac{t \cdot N}{t_m}} = \frac{t^{(N-1)}}{t_m^N \cdot \Gamma(N)} \cdot e^{-\frac{t \cdot N}{t_m}} \quad [6]$$

$$N = \frac{t_m^2}{\sigma_t^2} = \frac{1}{\sigma_\theta^2} \quad [7]$$

$$E(\theta) = \frac{N \cdot (N \cdot \theta)^{N-1}}{\Gamma(N)} \cdot e^{-N \cdot \theta} \quad [8]$$

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, pode-se interpretar que a coluna comporta-se como uma célula perfeitamente agitada.

A variância para o tempo adimensional (σ_θ^2) pode ser obtida por meio da Equação [9]:

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_t^2}{t_m^2} \quad [9]$$

3.3.3 | Modelo de dispersão axial

Este modelo 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. Um balanço do elemento de interesse (traçador, para o presente trabalho) que é transportado ao longo da coluna de comprimento L, por convecção e dispersão é representado, em variáveis normalizadas, pela Equação [10].

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} + \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{1}{Pe} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad [10]$$

onde $\theta=t/t_m$, $z=x/L$, $1/Pe=D/(u.L)=N_d$, sendo: C, a concentração de traçador; u, a velocidade de escoamento do traçador na direção axial x; D, o coeficiente de dispersão axial do traçador na coluna. Pe é um adimensional, conhecido como número de Peclet, 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. A coluna de flotação é geralmente considerada como um tipo de reator com escoamento intermediário entre as duas condições extremas citadas (MANKOSA et al., 1992). N_d é um parâmetro adimensional, conhecido como *vessel dispersion number*, utilizado para quantificar a intensidade de mistura axial no equipamento, sendo igual ao inverso de Pe. Desta forma, para D ou N_d vale o inverso da análise feita para Pe. Portanto, o conhecimento destes parâmetros permite avaliar a intensidade de mistura de uma determinada fase no interior de um equipamento, a exemplo das células de flotação.

Para a solução da Equação [10] foi utilizada a condição de contorno para fronteiras abertas à difusão, conhecida como *open-open* e para $N_d > 0,01$, conforme apresentado na Equação [11] (DOBBY e FINCH, 1985; ITYOKUMBUL et al., 1988; LEVENSPIEL, 1999).

$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_m \cdot Pe}{\pi \cdot t^3}} \cdot e^{\left(-\frac{Pe \cdot (t_m - t)^2}{4 \cdot t \cdot t_m} \right)} \quad [11]$$

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os primeiros experimentos foram realizados na coluna de 2" de diâmetro utilizando dois tipos de traçadores químicos para a fase líquida, o corante azul de metileno e o sal inorgânico KCl, para fins de comparação e escolha para os ensaios seguintes. Para este propósito, avaliou-se inicialmente a velocidade superficial de alimentação da coluna (J_f), para uma faixa de tempo de residência nominal entre 10 e 20 minutos, comumente utilizado em processo de flotação em coluna. Os resultados experimentais de distribuição de tempos de residência - $E(t)$ com o tempo - (t) , obtidos por meio da Equação [3], para o traçador KCl, estão apresentados na Figura 4 (a) e para a forma adimensional na Figura 4 (b) e para o traçador azul de metileno nas Figuras 5 (a) e (b). As curvas de calibração obtidas entre medidas de concentração do KCl com condutividade elétrica e concentração do azul de metileno com absorvância apresentaram coeficiente de correlação (R^2) para retas de 0,999 e 0,998, respectivamente.

As tendências das curvas de DTR foram muito parecidas para ambos traçadores, de forma que foi escolhido o KCl para os demais ensaios, pois além de ser mais utilizado na literatura, é quimicamente mais estável que o azul de metileno (MB), que possui características fotossensíveis. Não obstante, já foi relatado na literatura problemas de adsorção excessiva do MB quando utilizado com sólidos (DOBBY e FINCH, 1985). A vantagem deste último reside na percepção visual da variação de concentração do traçador, por variação de cor da solução, no interior da coluna.

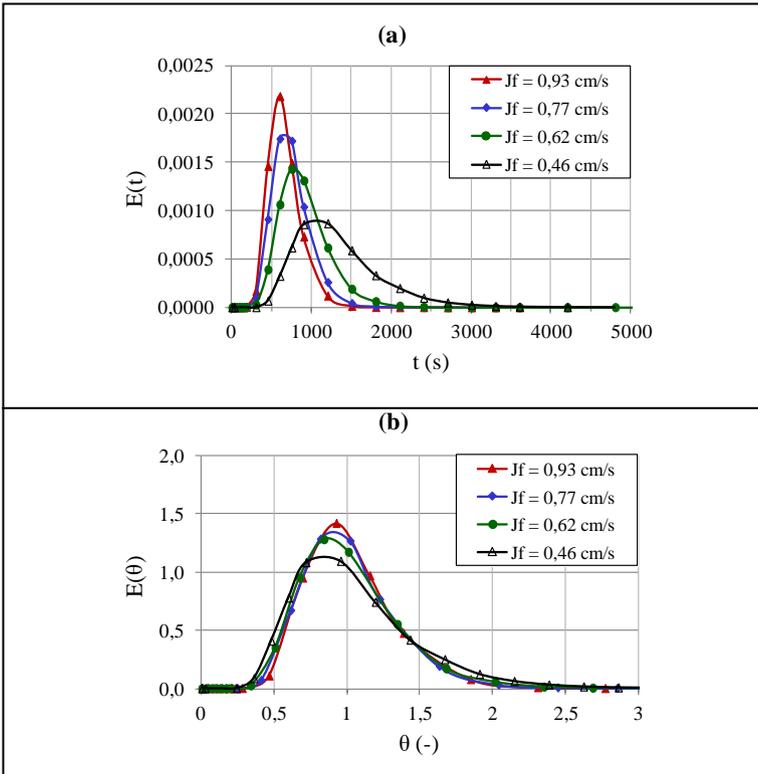


Figura 4. (a) Função de distribuição de tempos de residência com o tempo para diferentes valores de velocidade superficial de alimentação (J_f) e (b) em variáveis adimensionais, utilizando o KCl como traçador ($J_g=1,5$ cm/s; $J_w = 0$ cm/s; $C_f = 0$ mg/L).

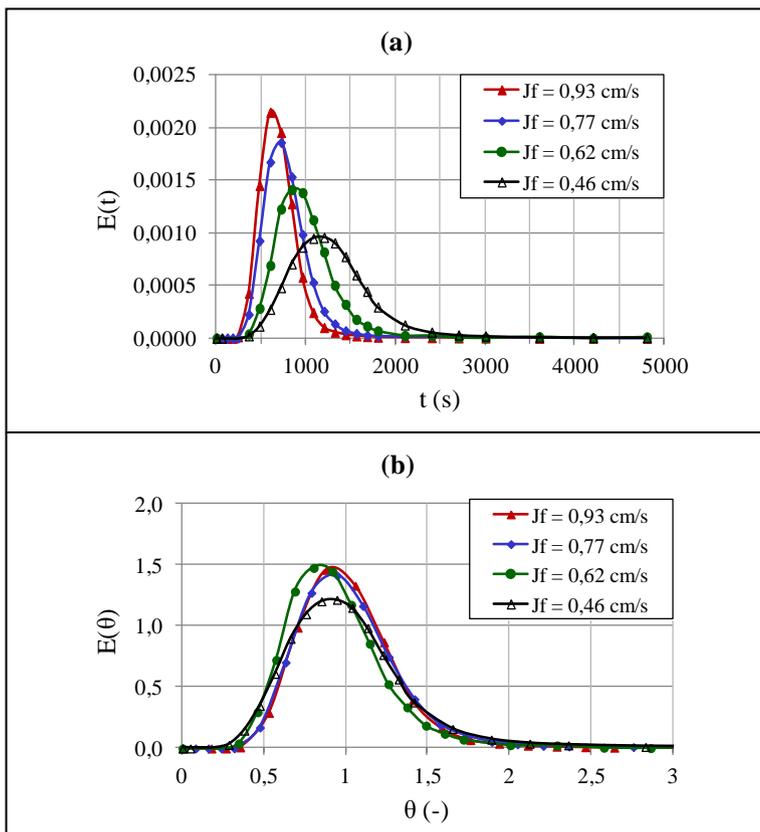


Figura 5. (a) Função de distribuição de tempos de residência com o tempo para diferentes valores de velocidade superficial de alimentação (J_f) e (b) em variáveis adimensionais, utilizando o azul de metileno como traçador ($J_g=1,5$ cm/s; $J_w = 0$ cm/s; $C_f = 0$ mg/L).

Os parâmetros hidrodinâmicos t_m , σ_0^2 e N foram também determinados para a variável velocidade superficial de alimentação (J_f), concentração de espumante (C_f), velocidade superficial de gás (J_g) e velocidade superficial de água de lavagem (J_w), utilizando sistemas discretos. Entretanto, somente os principais resultados serão apresentados neste trabalho. Cabe destacar que uma das vantagens da determinação dos parâmetros t_m e N por sistemas discretos estão 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.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 são apresentados os resultados dos parâmetros estimados pelos modelos de tanques CSTR em série e PFR com dispersão axial por meio das Equações [6] e [11], respectivamente, assim como os coeficientes de correlação (R^2) obtidos para as colunas de 2", 4" e 6" de diâmetro. Os parâmetros dos modelos foram estimados por regressão não-linear dos dados experimentais, utilizando o método de mínimos quadrados, com auxílio do *software* STATISTICA 12 (STATSOFT, INC., 2013).

Tabela 1. Parâmetros hidrodinâmicos para diferentes variáveis utilizando o modelo CSTR em série e o modelo PFR com dispersão axial – para coluna 2”.

| Variável | Condição | τ (s) | Tanques CSTR em série | | | | PFR com dispersão axial | | | | |
|-----------------------|----------|------------|-----------------------|-------|--------|----------------|-------------------------|-------|-------|--------|----------------|
| | | | t_m (s) | N | R^2 | $\tau-t_m$ (s) | tm (s) | Pe | N_d | R^2 | $\tau-t_m$ (s) |
| J_g (cm/s) | 0,50 | 958,8 | 1001,1 | 12,90 | 0,9974 | -42,3 | 1023,1 | 24,01 | 0,042 | 0,9990 | -64,3 |
| | 1,00 | 1047,9 | 950,4 | 11,19 | 0,9958 | 97,5 | 974,7 | 20,62 | 0,048 | 0,9996 | 73,2 |
| | 1,50 | 1047,9 | 893,8 | 9,59 | 0,9980 | 154,1 | 921,4 | 17,03 | 0,059 | 0,9996 | 126,5 |
| | 2,00 | 1047,9 | 885,0 | 8,86 | 0,9954 | 162,9 | 914,2 | 15,91 | 0,063 | 0,9996 | 133,7 |
| J_f (cm/s) - KCL | 0,46 | 1397,2 | 1258,5 | 7,56 | 0,9920 | 138,7 | 1312,6 | 12,86 | 0,078 | 0,9994 | 84,6 |
| | 0,62 | 1047,9 | 893,8 | 9,59 | 0,9980 | 154,1 | 921,4 | 17,03 | 0,059 | 0,9996 | 126,5 |
| | 0,77 | 838,6 | 736,2 | 10,76 | 0,9980 | 102,4 | 757,9 | 19,67 | 0,051 | 0,9984 | 80,7 |
| | 0,93 | 698,6 | 650,0 | 11,85 | 0,9960 | 48,6 | 677,9 | 21,75 | 0,046 | 0,9992 | 20,7 |
| C_f (mg/L) | 0,00 | 1047,9 | 893,8 | 9,59 | 0,9980 | 154,1 | 921,4 | 17,03 | 0,059 | 0,9996 | 126,5 |
| | 2,50 | 1047,9 | 828,4 | 4,36 | 0,9752 | 219,5 | 898,0 | 6,20 | 0,161 | 0,9996 | 149,9 |
| | 5,00 | 1047,9 | 791,1 | 4,63 | 0,9801 | 256,8 | 851,5 | 6,87 | 0,146 | 0,9998 | 196,4 |
| | 7,50 | 1047,9 | 837,2 | 4,62 | 0,9789 | 210,7 | 901,3 | 6,82 | 0,147 | 0,9994 | 146,7 |
| J_w (cm/s) | 0,00 | 1047,9 | 893,8 | 9,59 | 0,9980 | 154,1 | 921,4 | 17,03 | 0,059 | 0,9996 | 126,5 |
| | 0,10 | 1047,9 | 919,5 | 4,07 | 0,9777 | 128,4 | 1008,8 | 5,61 | 0,178 | 0,9998 | 39,1 |
| | 0,20 | 1047,9 | 1015,8 | 3,98 | 0,9641 | 32,1 | 1114,1 | 5,75 | 0,174 | 0,9954 | -66,2 |
| | 0,30 | 1047,9 | 1310,5 | 2,85 | 0,9479 | -262,6 | 1533,1 | 3,43 | 0,292 | 0,9964 | -485,2 |
| J_f (cm/s) - MB | 0,46 | 1397,2 | 1271,4 | 8,84 | 0,9972 | 125,8 | 1320,0 | 15,73 | 0,064 | 0,9910 | 77,2 |
| | 0,62 | 1047,9 | 964,2 | 11,39 | 0,9982 | 83,7 | 988,6 | 21,05 | 0,048 | 0,9974 | 59,3 |
| | 0,77 | 838,6 | 761,6 | 12,09 | 0,9990 | 77,0 | 779,4 | 22,46 | 0,045 | 0,9980 | 59,2 |
| | 0,93 | 698,6 | 681,8 | 13,23 | 0,9994 | 16,8 | 696,1 | 24,71 | 0,040 | 0,9970 | 2,5 |

Tabela 2. Parâmetros hidrodinâmicos para diferentes variáveis utilizando o modelo CSTR em série e o modelo PFR com dispersão axial – para coluna 4”.

| Variável | Condição | Tanques CSTR em série | | | | PFR com dispersão axial | | | | | |
|---------------------------------|----------|-----------------------|-----------|------|--------|-------------------------|-----------|------|-------|--------|------------------|
| | | τ (s) | t_m (s) | N | R^2 | $\tau - t_m$ (s) | t_m (s) | Pe | N_d | R^2 | $\tau - t_m$ (s) |
| J_g (cm/s) | 0,50 | 900,0 | 1053,1 | 4,53 | 0,9859 | -153,1 | 1140,4 | 6,98 | 0,143 | 0,9992 | -240,4 |
| | 1,00 | 900,0 | 833,5 | 4,41 | 0,9833 | 66,5 | 900,5 | 6,65 | 0,150 | 0,9986 | -0,5 |
| | 1,50 | 900,0 | 802,5 | 4,03 | 0,9783 | 97,5 | 875,6 | 5,86 | 0,171 | 0,9984 | 24,4 |
| J_l (cm/s) - KCl | 2,00 | 900,0 | 775,0 | 3,82 | 0,9757 | 125,0 | 850,0 | 5,37 | 0,186 | 0,9988 | 50,0 |
| | 0,52 | 1200,0 | 1056,4 | 3,50 | 0,9820 | 143,6 | 1185,0 | 4,76 | 0,210 | 0,9958 | 15,0 |
| | 0,70 | 900,0 | 802,5 | 4,03 | 0,9833 | 97,5 | 875,6 | 5,86 | 0,171 | 0,9976 | 24,4 |
| C_t (mg/L) | 0,87 | 720,0 | 644,7 | 4,50 | 0,9855 | 75,3 | 690,9 | 6,78 | 0,147 | 0,9988 | 29,1 |
| | 1,05 | 600,0 | 525,0 | 4,86 | 0,9883 | 75,0 | 558,2 | 7,54 | 0,133 | 0,9994 | 41,8 |
| | 0,0 | 900,0 | 802,5 | 4,03 | 0,9783 | 97,5 | 875,6 | 5,86 | 0,171 | 0,9988 | 24,4 |
| J_w (cm/s) com J_l fixo | 5,0 | 900,0 | 718,6 | 3,44 | 0,9789 | 181,4 | 799,2 | 4,62 | 0,216 | 0,9980 | 100,8 |
| | 10,0 | 900,0 | 720,1 | 3,27 | 0,9759 | 179,9 | 809,1 | 4,28 | 0,234 | 0,9982 | 90,9 |
| | 15,0 | 900,0 | 726,3 | 3,35 | 0,9759 | 112,1 | 811,9 | 4,46 | 0,224 | 0,9981 | 88,1 |
| J_g (cm/s) com Espumante | 30,0 | 900,0 | 691,2 | 3,33 | 0,9803 | 208,8 | 773,3 | 4,43 | 0,226 | 0,9974 | 126,8 |
| | 0,00 | 900,0 | 802,5 | 4,03 | 0,9783 | 97,5 | 875,6 | 5,86 | 0,171 | 0,9986 | 24,4 |
| | 0,10 | 900,0 | 696,8 | 4,34 | 0,9850 | 203,2 | 751,0 | 6,48 | 0,154 | 0,9992 | 149,0 |
| J_l (cm/s) com Espumante | 0,20 | 900,0 | 600,3 | 4,79 | 0,9834 | 299,7 | 639,4 | 7,37 | 0,136 | 0,9996 | 260,6 |
| | 0,30 | 900,0 | 544,6 | 4,86 | 0,9885 | 355,4 | 578,4 | 7,54 | 0,133 | 0,9989 | 321,6 |
| | 0,50 | 900,0 | 779,3 | 4,15 | 0,9805 | 120,7 | 846,5 | 6,08 | 0,165 | 0,9996 | 53,5 |
| J_w (cm/s) com Espumante | 1,00 | 900,0 | 749,5 | 3,82 | 0,9772 | 150,5 | 820,0 | 5,42 | 0,185 | 0,9994 | 80,0 |
| | 1,50 | 900,0 | 700,6 | 3,66 | 0,9788 | 199,4 | 771,8 | 5,08 | 0,197 | 0,9992 | 128,2 |
| | 2,00 | 900,0 | 695,4 | 3,54 | 0,9851 | 204,6 | 767,2 | 4,87 | 0,205 | 0,9966 | 132,8 |
| J_l (cm/s) com Espumante | 0,52 | 1200,0 | 914,4 | 3,17 | 0,9727 | 285,6 | 1041,6 | 4,04 | 0,248 | 0,9968 | 158,4 |
| | 0,70 | 900,0 | 700,6 | 3,66 | 0,9788 | 199,4 | 771,8 | 5,08 | 0,197 | 0,9992 | 128,2 |
| | 0,87 | 720,0 | 591,2 | 4,08 | 0,9842 | 128,8 | 639,9 | 5,98 | 0,167 | 0,9992 | 80,2 |
| J_w (cm/s) com J_l variável | 1,05 | 600,0 | 502,1 | 4,44 | 0,9875 | 97,9 | 538,6 | 6,77 | 0,148 | 0,9994 | 61,4 |
| | 0,00 | 900,0 | 802,5 | 4,03 | 0,9847 | 97,5 | 875,6 | 5,86 | 0,171 | 0,9986 | 24,4 |
| | 0,10 | 900,0 | 781,7 | 4,09 | 0,9831 | 118,3 | 850,3 | 5,96 | 0,168 | 0,9980 | 49,7 |
| J_w (cm/s) com J_l variável | 0,20 | 900,0 | 786,6 | 4,07 | 0,9849 | 113,4 | 856,2 | 5,95 | 0,168 | 0,9986 | 43,8 |
| | 0,30 | 900,0 | 786,4 | 4,02 | 0,9841 | 113,6 | 857,3 | 5,85 | 0,171 | 0,9980 | 42,7 |

Tabela 3. Parâmetros hidrodinâmicos para diferentes variáveis utilizando o modelo CSTR em série e o modelo PFR com dispersão axial – para coluna 6”.

| Variável | Condição | τ (s) | Tanques CSTR em série | | | | PFR com dispersão axial | | | | | |
|--------------------------------|----------|------------|-----------------------|------|--------|------------------|-------------------------|------|-------|--------|------------------|--|
| | | | t_m (s) | N | R^2 | $\tau - t_m$ (s) | t_m (s) | Pe | N_d | R^2 | $\tau - t_m$ (s) | |
| J_g (cm/s) | 0,50 | 900 | 882,7 | 3,64 | 0,9666 | 17,3 | 983,2 | 5,02 | 0,199 | 0,9995 | -83,2 | |
| | 1,00 | 900 | 859,3 | 3,10 | 0,9756 | 40,7 | 982,8 | 3,90 | 0,257 | 0,9958 | -82,8 | |
| | 1,50 | 900 | 810,2 | 2,69 | 0,9621 | 89,8 | 955,9 | 3,10 | 0,323 | 0,9953 | -55,9 | |
| J_f (cm/s) | 0,47 | 1200 | 967,0 | 2,20 | 0,9311 | 233,0 | 1248,7 | 2,06 | 0,486 | 0,9895 | -48,7 | |
| | 0,62 | 900 | 760,2 | 2,35 | 0,9497 | 139,8 | 945,0 | 2,42 | 0,413 | 0,9935 | -45,0 | |
| | 0,78 | 720 | 570,9 | 2,69 | 0,9653 | 149,1 | 680,1 | 3,12 | 0,321 | 0,9975 | 39,9 | |
| com Espumante | 0,94 | 600 | 527,2 | 2,74 | 0,9601 | 72,8 | 629,5 | 3,19 | 0,313 | 0,9993 | -29,5 | |
| | 0,0 | 900 | 809,2 | 2,70 | 0,9623 | 90,8 | 953,9 | 3,11 | 0,322 | 0,9951 | -53,9 | |
| | 5,0 | 900 | 745,2 | 2,55 | 0,9562 | 154,8 | 900,5 | 2,81 | 0,356 | 0,9968 | -0,5 | |
| C_f (mg/L) | 10,0 | 900 | 772,4 | 2,32 | 0,9441 | 127,6 | 973,4 | 2,33 | 0,429 | 0,9948 | -73,4 | |
| | 15,0 | 900 | 753,7 | 2,26 | 0,9427 | 146,3 | 958,8 | 2,24 | 0,447 | 0,9950 | -58,8 | |
| | 0,00 | 900 | 809,2 | 2,70 | 0,9623 | 90,8 | 953,9 | 3,11 | 0,322 | 0,9951 | -53,9 | |
| J_w (cm/s) com J_f fixo | 0,10 | 900 | 819,7 | 2,71 | 0,9660 | 80,3 | 969,3 | 3,13 | 0,320 | 0,9957 | -69,3 | |
| | 0,20 | 900 | 686,1 | 2,90 | 0,9709 | 213,9 | 793,9 | 3,56 | 0,281 | 0,9978 | 106,1 | |
| | 0,50 | 900 | 800,8 | 2,85 | 0,9685 | 99,2 | 933,0 | 3,42 | 0,293 | 0,9972 | -33,0 | |
| J_g (cm/s) com Espumante | 1,00 | 900 | 746,5 | 2,44 | 0,9548 | 153,5 | 915,2 | 2,61 | 0,383 | 0,9964 | -15,2 | |
| | 1,50 | 900 | 765,9 | 2,34 | 0,9456 | 134,1 | 959,9 | 2,37 | 0,421 | 0,9944 | -59,9 | |
| | 2,00 | 900 | 937,0 | 2,09 | 0,9257 | -37,0 | 1239,0 | 1,89 | 0,530 | 0,9898 | -339,0 | |

De uma forma geral, observa-se uma predominância de zonas mortas (onde $t_m < \tau$) nas colunas avaliadas com intensidades variadas (dependendo do valor da diferença $\tau - t_m$), o que pode estar relacionado com o fato de existir um volume de estagnação, abaixo do dispersor poroso da coluna, que não sofre mistura das bolhas geradas, evidenciado por uma pequena estagnação de sólidos nesta região durante ensaios contínuos de flotação, conforme observado em outros trabalhos com sistemas trifásicos. Já para os parâmetros estimados pelo modelo PFR com dispersão axial para a coluna de 6" nota-se a presença de curto-circuito (onde $t_m > \tau$). Cabe ressaltar que na coluna de 6" o sistema de geração de bolhas é diferente das demais, composto por um tubo de cavitação (*cavitation tube*), onde a fase líquida é recirculada com auxílio de uma bomba externa. Para as colunas de 2" e 4" o sistema de geração de bolhas é composto por um tubo poroso, sem recirculação externa da fase líquida, o que justifica as diferenças encontradas com relação à diferença ($\tau - t_m$).

Para todas as colunas, as estimativas dos parâmetros para os dois modelos fluidodinâmicos foram realizadas com sucesso, com pequena vantagem para o modelo PFR com 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 utilizada apenas para

valores de Pe acima de aproximadamente 16 (MAVROS, 1993; MAVROS, 1992), foi possível obter bons ajustes (R^2 acima de 0,99) para valores de Pe abaixo deste valor.

As Figuras 6 e 7 (a) apresentam os resultados experimentais de distribuição de tempos de residência - $E(t)$ com o tempo (t), obtidos por meio da Equação [3] e as Figuras 6 e 7 (b) apresentam os

resultados para a forma adimensional, para as colunas de flotação de 4" e 6" de diâmetro, respectivamente. 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.

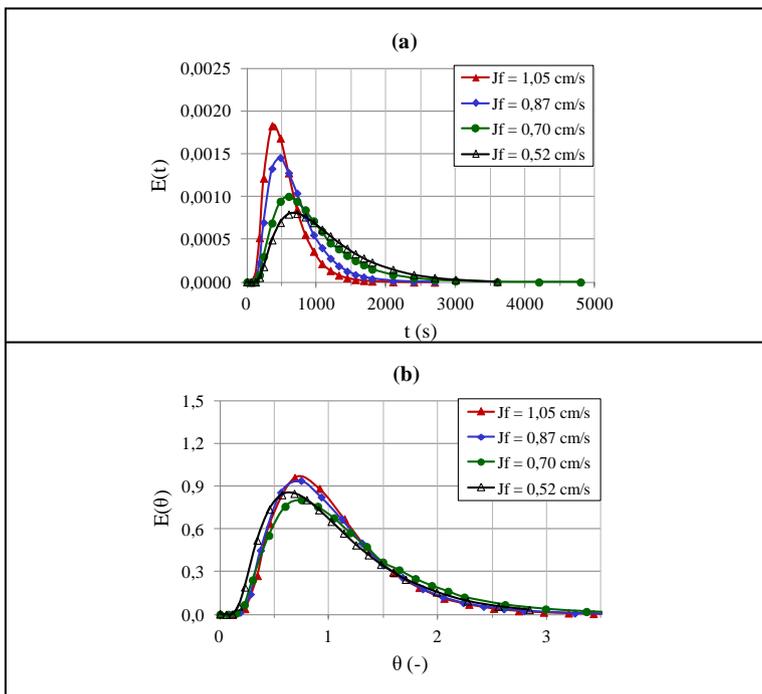


Figura 6. (a) Função de distribuição de tempos de residência com o tempo para diferentes valores de J_f e (b) em variáveis adimensionais – Coluna 4". Condições: $J_w = 0$; $J_g = 1,5$ cm/s; $C_f = 0$ mg/L.

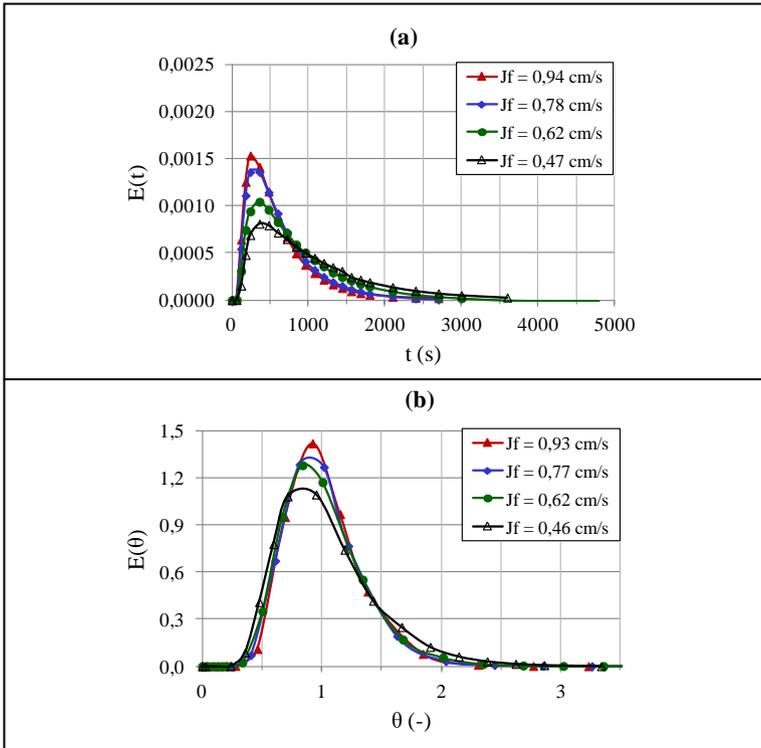


Figura 7. (a) Função de distribuição de tempos de residência com o tempo para diferentes valores de J_f e (b) em variáveis adimensionais – Coluna 6". Condições: $J_w = 0$; $J_g = 1,5$ cm/s; $C_f = 10$ mg/L.

Na Figura 8 são apresentados os valores do tempo espacial (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 da mesma variável (J_f) para a coluna de 2" em (a), 4" em (b) e 6" em (c). Pode-se observar que houve uma diminuição no tempo de residência

médio com o aumento na velocidade superficial de alimentação, conforme esperado, em função do aumento da vazão de alimentação para um volume fixo da coluna.

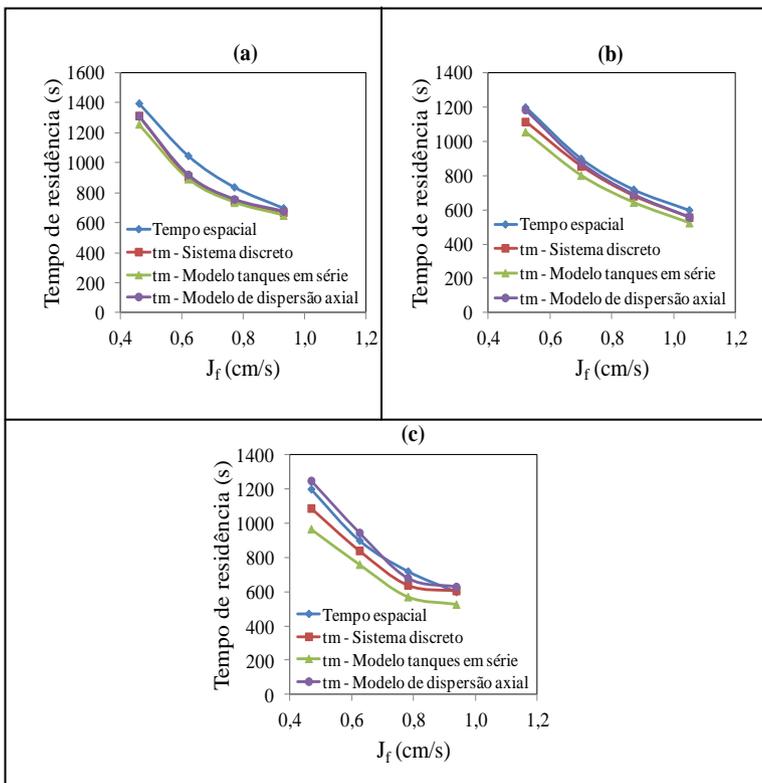


Figura 8. Tempos de residência médio obtidos a partir de sistemas discretos e os dois modelos avaliados (a) coluna de 2'' ($J_g=1,5$ cm/s; $J_w=0$ cm/s; $C_f=0$ mg/L), (b) coluna de 4'' ($J_g=1,5$ cm/s; $J_w=0$ cm/s; $C_f=0$ mg/L), (c) coluna de 6'' ($J_g=1,5$ cm/s; $J_w=0$ cm/s; $C_f=10$ mg/L).

Os parâmetros hidrodinâmicos (N e Pe) foram analisados para cada uma das colunas (em diferentes condições) utilizando os modelos CSTR e de PFR, por meio das Equações [6] e [11] respectivamente.

Na Figura 9 são apresentadas os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos N (a) e Pe (b) em função da velocidade superficial de alimentação (J_f), com e sem a presença de espumante.

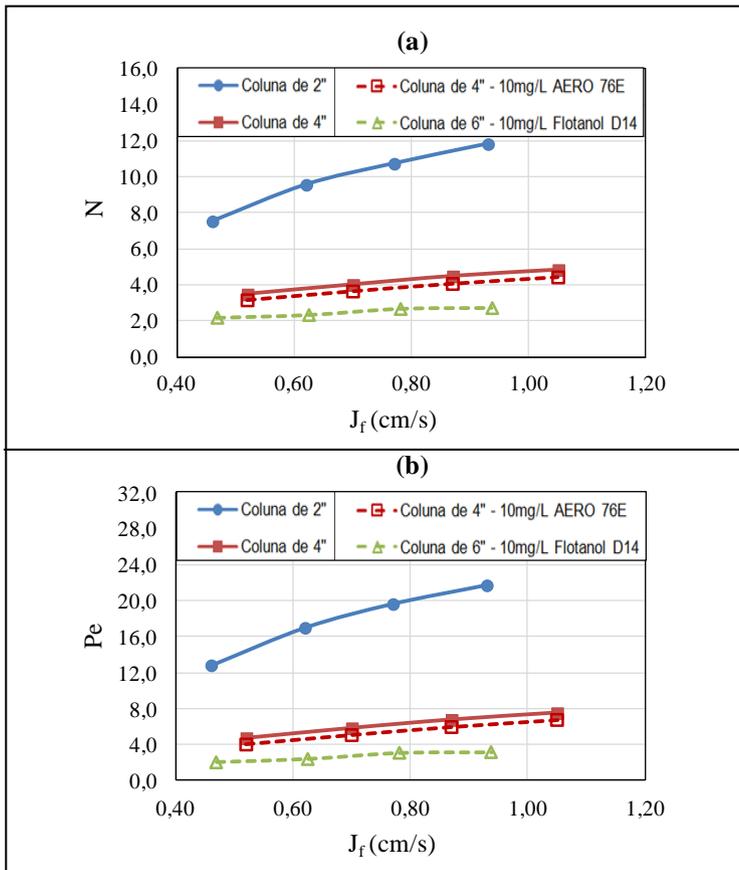


Figura 9. (a) N e (b) Pe em função de J_f para as colunas de 2", 4" e 6".

Observa-se o mesmo comportamento para ambos os parâmetros de aumento do número de tanques CSTR em série (N) e número de Peclet (Pe) com o aumento da velocidade superficial de alimentação. Estes resultados mostram uma diminuição da intensidade de mistura no interior da coluna em função do aumento de J_f , principalmente para a coluna de 2", 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 e 1992). O mais aceito na literatura é que o aumento na velocidade superficial de alimentação, que leva um aumento na velocidade intersticial de líquido na direção axial da coluna em fluxo descendente, causa uma menor perturbação no fluxo de bolhas de gás ascendente e, conseqüentemente, uma diminuição da turbulência na coluna (MAVROS et al. 1989; SHUKLA et al., 2010).

Também foi possível observar que a presença do espumante levou a uma pequena diminuição de N e Pe , 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.

Na Figura 10 são apresentadas os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos N (**a**) e Pe (**b**) em função da velocidade superficial de ar (J_g), com e sem a presença de espumante.

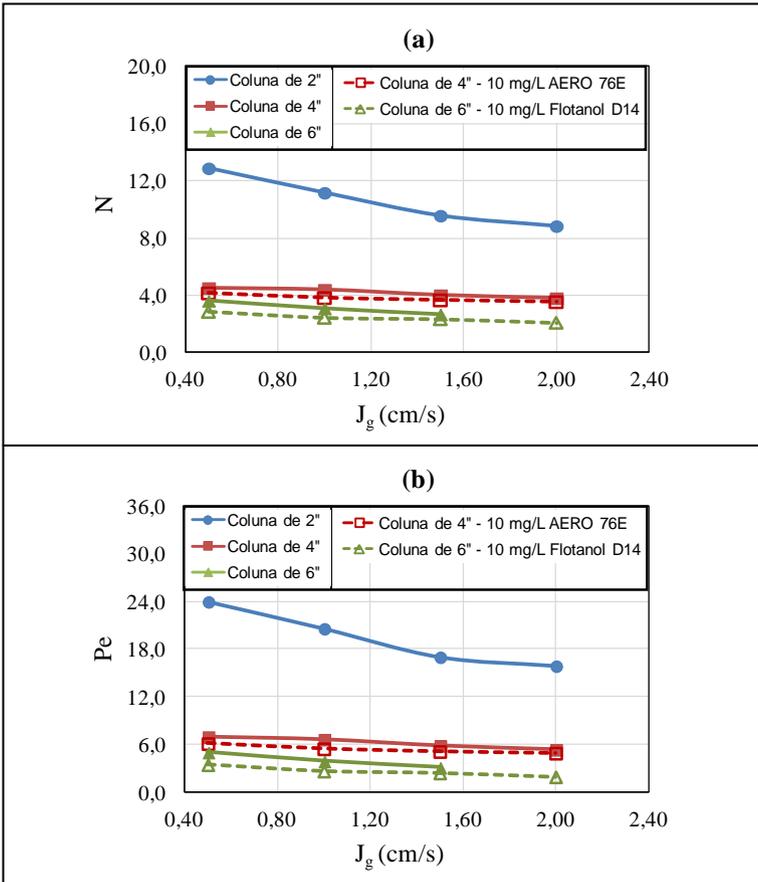


Figura 10. (a) N e (b) Pe em função de J_g para as colunas de 2'', 4'' e 6''.

Nota-se 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 e O'CONNOR, 1991; MAVROS e DANILIDOU, 1993; SHUKLA et al., 2010). Isso é uma consequência do aumento do

número de bolhas por unidade de volume de ar admitido nas colunas, o que leva a uma maior turbulência na zona de coleta. O aumento do número de bolhas neste caso é 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.

Na Figura 11 são apresentadas os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos **N (a)** e **Pe (b)** em função da velocidade superficial de água de lavagem (J_w).

Verifica-se que para as colunas de 4" e 6" a velocidade superficial de água de lavagem (J_w) apresentou comportamento bastante similar àquele observado na variação da velocidade superficial de alimentação (J_f). 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).

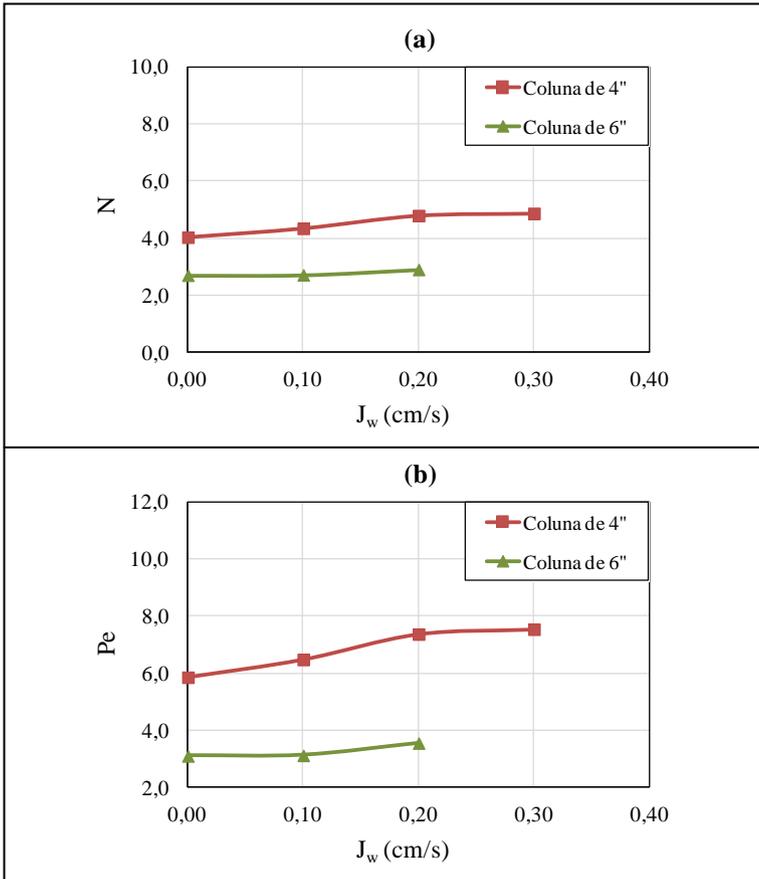


Figura 11. (a) N e (b) Pe em função de J_w para as colunas de 2", 4".

Na Figura 12 são apresentadas os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos N (a) e Pe (b) em função da concentração de espumante (C_f).

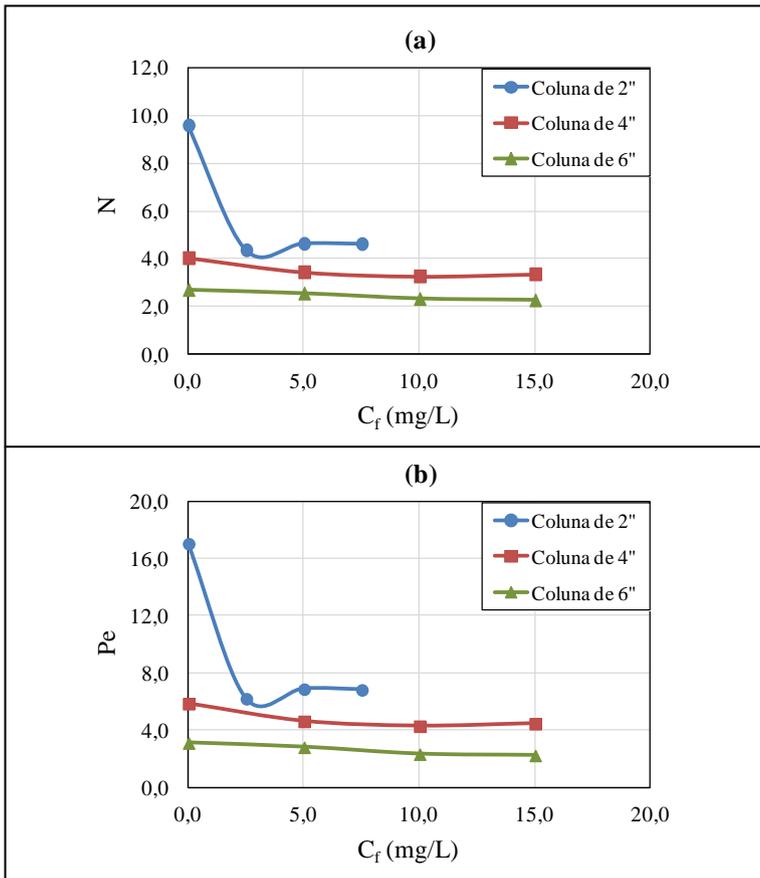


Figura 12. (a) N e (b) Pe em função de C_f para as colunas de 2", 4" e 6".

Observa-se que 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*), conforme também observado por SHUKLA et al., 2010.

De maneira geral, foi observado que, para todas as variáveis avaliadas, o aumento de diâmetro da coluna levou a uma maior mistura da fase líquida, fato constatado pelos menores valores de N e Pe nas mesmas faixas de trabalho das variáveis estudadas. Uma observação similar foi obtida por MAVROS e DANILIDOU (1993), na análise de J_f , ao avaliar colunas de bancada com diferentes diâmetros.

Além dos estudos de DTR nas colunas, foram determinadas também as medidas de fração volumétrica de ar nas colunas de 2" e 4", conhecido como *gas hold up* (ϵ_g), e de tensão superficial (γ) das soluções de espumante empregadas. As medidas de *gás hold up* foram determinadas pela metodologia de medida de nível, ou volume com auxílio de uma escala calibrada fixada à coluna, também conhecido como método de deslocamento de líquido pelo gás (*overall hold up*).

Na Figura 13 são apresentados os resultados de fração volumétrica de ar nas colunas 2" (a) e 4" (b) em função da velocidade superficial do ar (J_g), para diferentes concentrações dos espumantes Flotanol D25 e AERO 76E, respectivamente, e na Figura 14 são apresentados os resultados da tensão superficial em função da concentração dos espumantes Flotanol D25 (a) e AERO 76E (b).

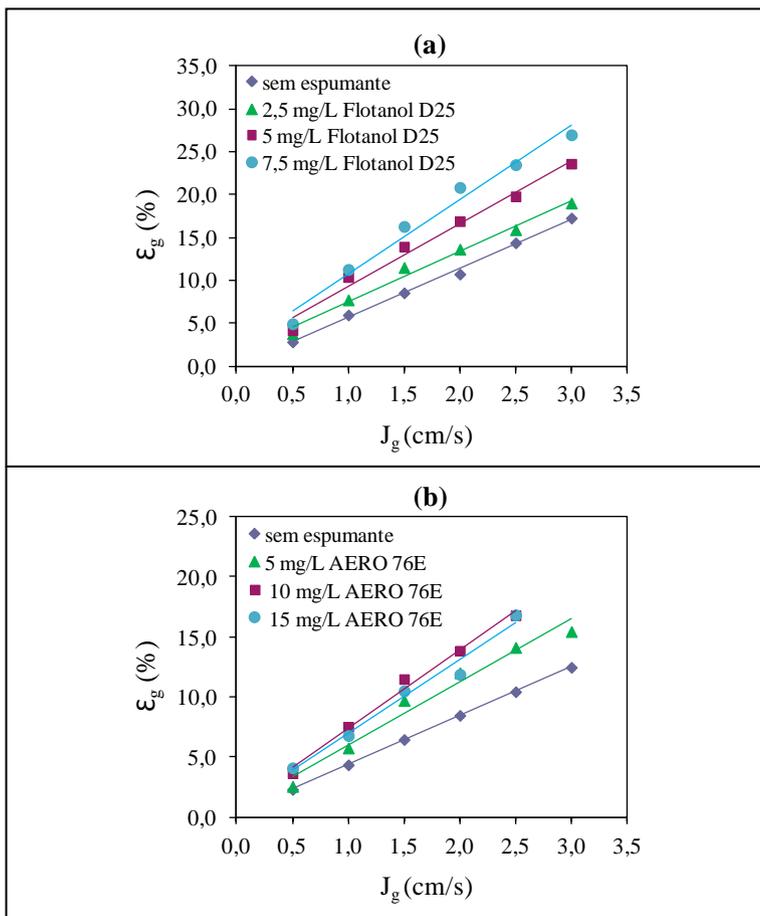


Figura 13. Curvas de *hold up* de gás em função da velocidade superficial do ar para diferentes concentrações de espuma. **(a)** Coluna de 2" e **(b)** coluna de 4".

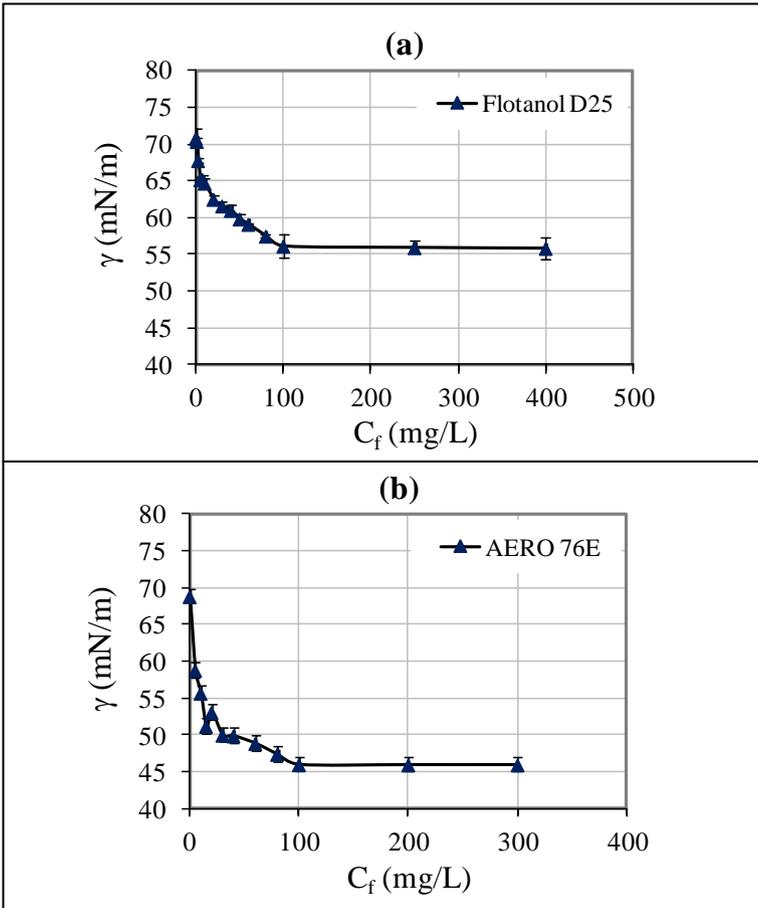


Figura 14. Tensão superficial em função da concentração do espumante (a) Flotanol D25 e (b) AERO 76E.

Da Figura 13 pode-se observar um aumento praticamente linear do *hold up* de gás com o aumento da velocidade superficial do ar, em função do aumento do número de bolhas para maiores vazões de ar, o que é intensificado com o aumento da concentração de espumante.

Este resultado pode ser explicado pela redução da tensão superficial (γ) da solução de espumante na faixa estudada, conforme observado na Figura 14, levando a uma minimização da coalescência de bolhas em função da orientação das moléculas do espumante na superfície destas bolhas (interface gás-líquido), em conformidade com diversos trabalhos da literatura (FINCH e DOBBY, 1990; ITYOKUMBUL et al., 1995; COUTO et al., 2009; PÉREZ-GARIBAY et al., 2012).

Em relação a Figura 13 **(b)**, observa-se que para concentrações de 10 e 15 mg/L de AERO 76E praticamente não houve mudança nos valores de *hold up* de gás, indicando que a concentração crítica de coalêscencia (CCC) deste espumante, que corresponde à menor concentração que proporciona o menor diâmetro de bolha, encontra-se próximo de 10 mg/L.

5 | CONCLUSÕES

As curvas de *hold up* de gás para os espumantes Flotanol D25 e AERO 76E apresentaram um aumento praticamente linear com o aumento da velocidade superficial de do ar. A tensão superficial desses espumantes diminui com o aumento da concentração do espumante até a estabilização.

Para todas as variáveis avaliadas, a coluna de maior diâmetro (6" ou 15,2 cm) apresentou maior dispersão, mistura da fase líquida, fato constatado pelos menores valores de N e Pe .

De acordo com os resultados obtidos 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 das colunas 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.

6 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CETEM pela infraestrutura oferecida para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, J.A., OLIVEIRA, M.L.M., FERNANDES, M.D. Flotação em Colunas, in: Tratamento de Minérios, 5th Ed., Luz, A.B., Sampaio, J.A., França, S.C.A. (Eds.), CETEM/MCT, 2010. Rio de Janeiro, p. 517-556.

COUTO, H.J.B., NUNES, D., NEUMANN, R., FRANCA, S.C.A., 2009. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique, *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 330-335.

DOBBY, G.S., FINCH, J.A. Mixing characteristics of industrial flotation columns., *Chem. Eng. Sci.* 1985, 40(7).

FINCH, J.A., DOBBY G.S. *Column Flotation*, Pergamon Press, 1st Ed., 1990.

FOGLER, H.S. Residence time distributions. *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2nd Ed., Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, 1992.

GOODALL, C.M., O'CONNOR, C.T. Residence time distribution studies in a flotation column. Part 1: The modelling of residence time distributions in a laboratory column flotation cell. *Int. J. Miner. Process.* 1991; 31, 97-113.

GOODALL, C.M., O'CONNOR, C.T. Residence time distribution studies in a flotation column. Part 2: the relationship between solids residence time distribution and metallurgical performance. *Int. J. Miner. Process.* 1992; 36, 219-228.

ITYOKUMBUL, M.T., KOSARIC, N., BULANI, W. Parameter estimation with simplified boundary conditions. *Chem. Eng. Sci.* 1988; 43 (9), p. 2457-2462.

ITYOKUMBUL, M.T., KOSARIC, N., BULANI, W., 1995. Effect of fine solids and frother on gas hold-up and liquid mixing in a flotation column. *Minerals Engineering*, Volume 8, Issue 11, p. 1369-1380.

KELLY, E.G., SPOTTISWOOD, D.J. *Introduction to mineral processing*. John Wiley & Sons, 1982.

LEVENSPIEL, O. Part II: Flow Patterns, Contacting, and Non-Ideal Flow, in: *Chemical Reaction Engineering*. 3thEd., John Wiley & Sons, 1999. USA, 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. REM: Rev. Esc. Minas, 2005, Ouro Preto, 58 (3), p. 213 - 218.

MANKOSA, M.J., LUTTRELL, G.H., ADEL, G.T., YOON, R.H. A study of axial mixing in column flotation. Int. J. Miner. Process. 1992; 35 (1), 51-64.

MAVROS, P. Technical note validity and limitations of the closed-vessel analytical solution to the axial dispersion model. Minerals Engineering 1992; 5(9), 1053-1060.

MAVROS, P. Mixing in flotation columns. Part I: Axial dispersion modelling. Minerals Engineering 1993, 6 (5), 465-478.

MAVROS, P., DANILIDOU, A. Mixing in flotation columns. Part II. Liquid-phase residence time distributions studies. Minerals Engineering 1993; 6 (7), 707-719.

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.

MAZON, R. Efeito do tempo de residência sobre a recuperação metálica da flotação colunar reversa de minério de ferro. 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

MELO, M.V., Tratamento de Águas Oleosas por Flotação, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2002.

PÉREZ-GARIBAY, R., MARTÍNEZ-RAMOS E., RUBIO, J., 2012. Gas dispersion measurements in microbubble flotation systems. Minerals Engineering 26, p. 34–40.

SANTOS, A.R. Estudo do Comportamento Dinâmico de Colunas de Flotação Utilizando Técnicas Nucleares. [Dissertação de Mestrado]. 134, p. CDTN\CNEN, Belo Horizonte – MG (Brasil); 2005.

SHUKLA, S.C., KUNDU, G., MUKHERJEE, D. Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal. Minerals Engineering 2010, 23 (8), 636-642.

ZWIETERING, T.N. The degree of mixing in continuous systems. Chem. Eng. Sci. 1959; 11, 1-15.

StatSoft, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 12, 2013.
www.statsoft.com.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2017, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 320 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Mineral

STM- 99 – Revisão de alguns principais métodos utilizados em modelagem molecular – Parte II – Métodos quânticos. Kelly Fernandes Pessoa, Julio Cesar Guedes Correia, Alexandre Nelson M. Carauta e Fernanda Barbosa da Silva, 2018.

STM-98 – Revisão de alguns principais métodos utilizados em modelagem molecular – Parte I – Mecânica molecular. Kelly Fernandes Pessoa, Julio Cesar Guedes Correia, Alexandre Nelson M. Carauta e Fernanda Barbosa da Silva, 2018.

STM-97 – Breve revisão sobre a recuperação de tório por precipitação no processamento químico de terras-raras. Vanessa Monteiro Ribeiro, Nice de Vasconcelos Coimbra e Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos, 2016.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 40 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.