

## **AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM CIRCUITO INDUSTRIAL DE MOAGEM-CLASSIFICAÇÃO**

E.B. DE JESUS<sup>1</sup> e L.R.P. DE ANDRADE LIMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial

<sup>2</sup> Universidade Federal da Bahia, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais

E-mail para contato: lelo@ufba.br

**RESUMO** – Testes com traçador para avaliar a distribuição de tempos de residência são usados em diversos tipos de circuitos em processos químicos e bioquímicos, porém são escassos em usinas de tratamento de minérios. Um ensaio com traçador foi utilizado para avaliar as características de um circuito industrial de moagem-classificação de uma usina de tratamento de minérios auríferos. LiCl foi injetado na forma de pulso e amostras de polpa foram coletadas em três pontos do circuito. As distribuições de tempos de residência foram determinadas usando as concentrações de Li na fase aquosa, dosada por absorção atômica. A análise das distribuições confirma a presença de reciclos no circuito, o que aumenta o tempo de residência médio. O tempo de residência global da fase líquida no circuito foi de 8,3 minutos. Esta distribuição ajustou-se bem com um modelo compartimentado, composto por seis reatores de mistura perfeita, dois divisores de fluxo e um reciclo.

### **1. INTRODUÇÃO**

A moagem na indústria minero-metalúrgica é geralmente conduzida em moinhos tubulares e contínuos, que usam corpos moedores esféricos ou cilíndricos para promover a fragmentação das partículas. Na maioria dos casos, essa operação é realizada na presença de água, que atua como promotora do deslocamento das partículas no moinho. A moagem geralmente ocorre em circuitos fechados, com uma ou mais etapas de classificação. Estes circuitos são caracterizados pela presença de reciclos que estão associados com cargas circulantes. Testes sistemáticos com traçador para avaliar a distribuição de tempos de residência (DTR) são usados em diversos tipos de circuitos, porém são escassos em usinas de tratamento de minérios.

A distribuição do tempo de residência é uma ferramenta clássica utilizada para estudar o desempenho de reatores não ideais e circuitos industriais (Danckwerts, 1953; Naor e Shinnar, 1963; Levenspiel, 1999). Esta ferramenta permite diagnosticar a presença de zonas de estagnação, formação de canalizações, que permitem a saída antecipada ou curto-circuito (*bypass*), e o grau de dispersão e recirculações (Danckwerts, 1953; Levenspiel, 1999). O procedimento para a determinação da DTR consiste da realização de ensaios de estímulo-resposta onde a alimentação do sistema é perturbada por um sinal na forma de pulso, degrau, senóide ou variações aleatórias (Levenspiel, 1999).

Resultados prévios de ensaios com traçador, injetado na forma de pulso, realizado em moinhos de bolas, revelam que a hidrodinâmica desses equipamentos pode ser bem representada por uma associação de misturadores perfeitos. Foi identificada também a presença de zonas estagnadas (Makokha *et al.*, 2011). Os resultados encontrados na literatura são importantes para explicar, de maneira genérica, o comportamento hidrodinâmico desses equipamentos, porém os detalhes construtivos e operacionais nos circuitos industriais geram distribuições particulares. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento hidrodinâmico de um circuito industrial complexo de moagem-classificação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As investigações foram realizadas entre 15 e 22/04/2010 na usina de beneficiamento de ouro da Mineração Fazenda Brasileiro (MFB), localizada nas proximidades da cidade de Teofilândia, Bahia. A usina possui dois circuitos de moagem classificação que processam o minério aurífero. O estudo foi realizado no circuito 1, que é formado por um moinho de bolas com 5,2 m de comprimento por 3,0 m de diâmetro com descarga tipo *overflow*, e duas baterias de hidrociclones, dotadas de quatro hidrociclones com 38,1 cm de diâmetro, dos quais dois operam e dois ficam de reserva. O circuito tem três tanques de armazenamento e condicionamento de polpa, (tanques 1, 2 e 3) com capacidade de 10, 7 e 10 m<sup>3</sup>, respectivamente, nos quais, é adicionada água de processo para adequar a concentração de sólidos e facilitar o bombeamento da polpa. No circuito, há um concentrador gravimétrico centrífugo (Knelson), mas durante a realização do ensaio não estava em operação (Figura 1).

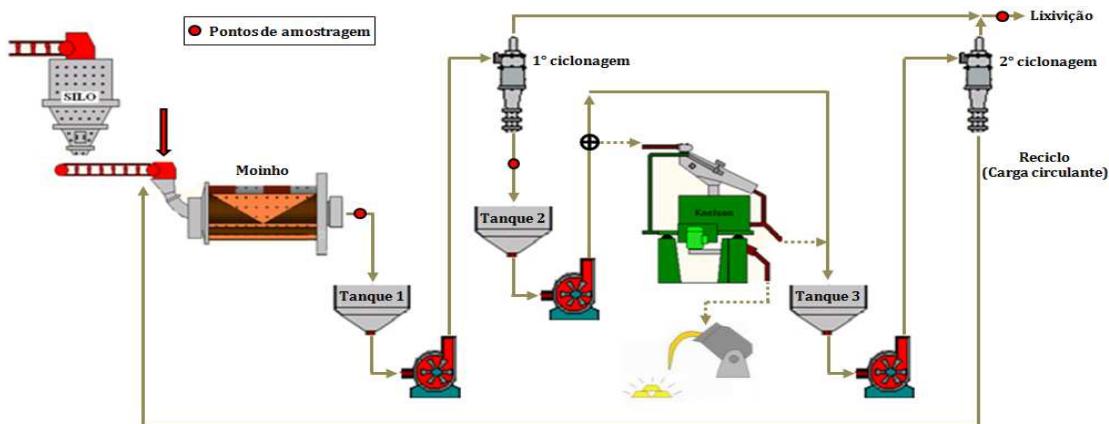


Figura 1 – Circuito de moagem-classificação 1 da MFB.

O circuito é alimentado com minério na entrada do moinho a uma taxa de, aproximadamente, 40 t/h. Juntamente com o minério, água de processo é adicionada para formar uma polpa com 75% de sólidos em massa. O moinho opera com um leito de bolas que ocupa cerca de 40% do seu volume. O produto da moagem tem 80% das partículas com tamanho abaixo de 74  $\mu\text{m}$ . Esta polpa é descarregada no tanque 1, onde água de processo é adicionada para diluí-la a 45% de sólidos. Uma bomba centrífuga acoplada ao tanque direciona a polpa para o primeiro estágio de classificação por tamanho. O *underflow* da primeira classificação possui granulometria 80% acima de 0,15 mm. Esta

corrente é descarregada no tanque 2 na forma de polpa com cerca de 60% de sólidos em massa. Durante o período de realização do ensaio, a polpa contida no tanque 2 foi transferida por bombeamento para o tanque 3. Neste tanque, água de processo foi adicionada para diluí-la a 45% de sólidos. Uma bomba centrífuga transfere a polpa para o segundo estágio de classificação. O *underflow* dessa classificação, na forma de polpa com cerca de 60% de sólidos, retorna por gravidade para a alimentação do moinho como a carga circulante do circuito de moagem-classificação. O *overflow* das duas etapas de classificação forma o produto final desta etapa.

A caracterização hidrodinâmica do circuito de moagem-classificação foi obtida através de ensaio com traçador, que consistiu na injeção instantânea de uma solução, contendo 5 kg de cloreto de lítio em 20 litros de água na alimentação do moinho. Amostras de polpa foram coletadas na descarga do moinho, na corrente dos grossos do primeiro estágio de classificação (*underflow* da primeira classificação) e na corrente dos finos das classificações ou produto do circuito (ver Figura 1).

Os tempos de coleta das amostras foram definidos por simulação do circuito usando dados operacionais da planta e funções de transferência aproximadas dos equipamentos. A Figura 2 apresenta o diagrama do circuito simulado. O modelo compartimentado, composto por misturadores perfeitos, foi utilizado para simular o circuito. O padrão de mistura do moinho foi representado por uma associação em série contendo um misturador perfeito grande seguido por dois pequenos. Este arranjo é conhecido por descrever moinhos de bolas em diferentes escalas (Austin *et al.*, 1984; Austin e Concha 1993, King, 2001). A solução usando o método de Runge-Kutta de quarta ordem foi feita usando o programa SIMULINK, MATLAB R2010a.

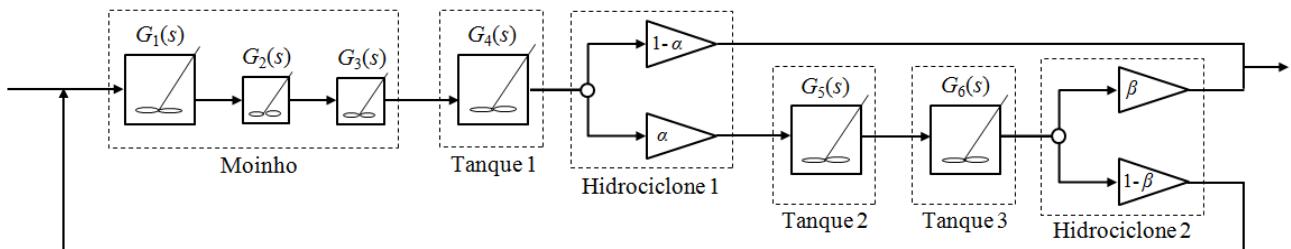


Figura 2 – Diagrama do circuito de moagem-classificação simulado.

A Figura 3 mostra o resultado da simulação utilizado para estimar o tempo de coleta das amostras. Os resultados indicam que após o impulso, a polpa sai do circuito num tempo inferior a 60 minutos, sendo que a maior parcela deixa o circuito num tempo inferior a 20 minutos.

Durante a realização do ensaio com traçador, a vazão de sólidos na alimentação do circuito de moagem-classificação foi mantida, aproximadamente, em 41,5 t/h. O aporte de água na alimentação do moinho e nos tanques 1 e 3, bem como a rotação do moinho e as vazões de bombeamento da polpa também foram mantidas constantes. As amostras foram coletadas em recipientes de 100 mL e vedadas em seguida. No laboratório, as amostras foram filtradas e a fase líquida foi utilizada para a determinação da concentração de lítio. As análises foram feitas por espectrometria de absorção atômica. Devido à limitação analítica, houve um atraso de vários meses entre a coleta e a análise das amostras, mas isso não compromete o resultado global do teste.

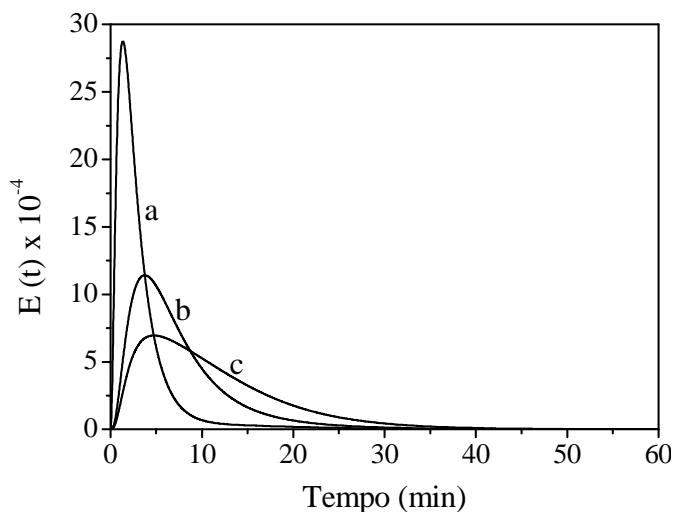


Figura 3 – Simulação da DTR: a) descarga do moinho; b) *underflow* da primeira classificação; c) produto do circuito.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução temporal das concentrações de lítio na fase líquida da polpa na descarga do moinho, no *underflow* da primeira classificação e do produto do circuito são apresentados na Figuras 4a,4b e 4c. Observa-se que, em um tempo inferior a 20 minutos, a maior parte do traçador deixa o circuito não sendo mais detectado nas amostras coletadas após 60 minutos.

As Figuras 4a, 4b e 4c mostram que existe um reciclo de sólidos ao passo que a água deixa o circuito através da corrente do produto. As concentrações elevadas de lítio detectadas nas amostras coletadas no *underflow* da primeira classificação podem estar relacionadas com a adsorção do lítio nas partículas dos minerais constituintes da polpa e ao atraso na análise química do traçador que pode ter permitido a adsorção-desorção do lítio na superfície de alguns minerais.

A Tabela 1 mostra o tempo de residência médio calculado para a descarga do moinho, *underflow* da primeira classificação e produto do circuito assim como as respectivas variâncias. Os resultados indicam que o tempo de residência médio da fase líquida no circuito é 8,3 minutos e que as distribuições são altamente dispersas. A elevada dispersão sugere que uma parcela significativa do líquido permanece no circuito por um período maior que o tempo de residência médio.

Tabela 1 – Tempo de residência médio e variância das distribuições

Descarga do moinho	<i>Underflow</i> da primeira classificação	Produto do circuito
$\tau$ (min)	7,97	6,75
$\sigma^2$ (min <sup>2</sup> )	50,41	49,47
		8,31
		65,70

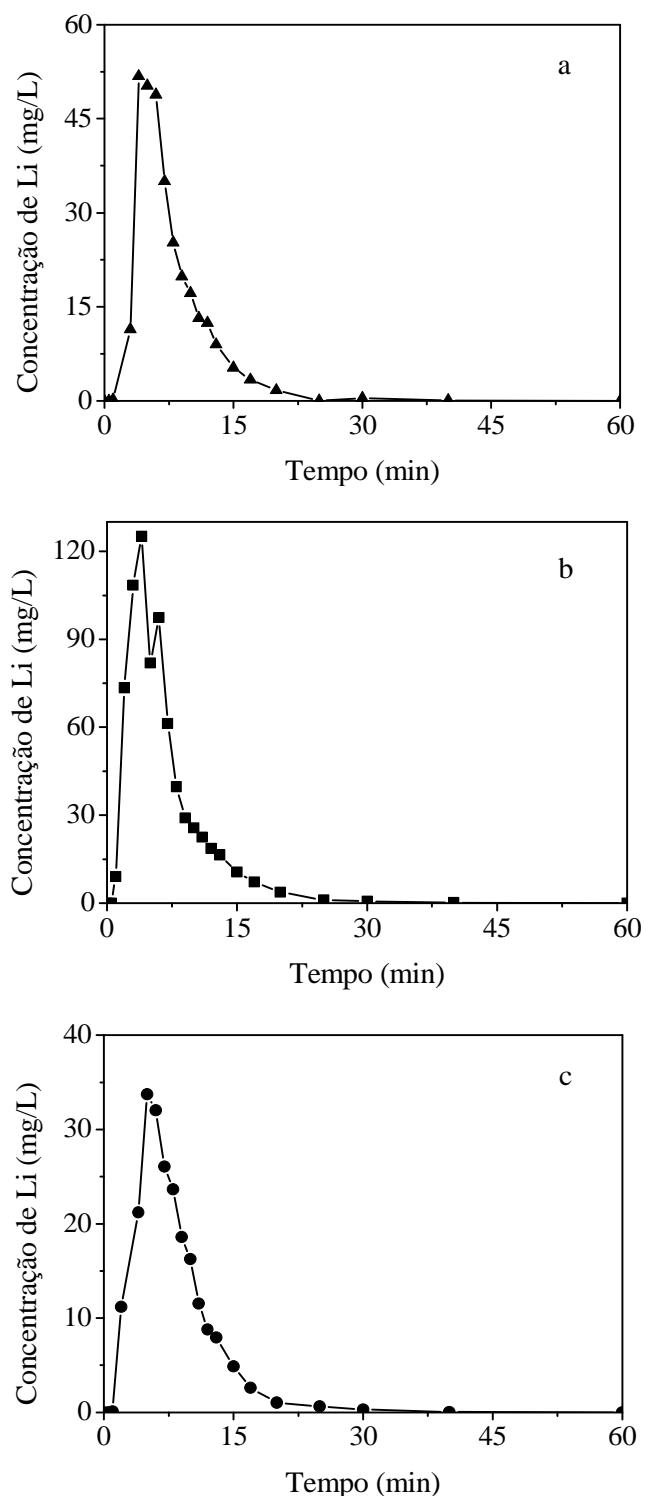


Figura 4 – Evolução temporal das concentrações de lítio na descarga do moinho (a), *underflow* da primeira classificação (b), e produto do circuito (c).

As distribuições do tempo de residência adimensional,  $E(\theta)$ , que são usadas para comparar o comportamento hidrodinâmico de diferentes reatores e o efeito das condições operacionais, podem ser vistas na Figuras 5. Observa-se que as distribuições adimensionais apresentam semelhanças de padrões. A descarga do moinho se aproxima da distribuição de um reator de fluxo pistonado com presença de uma calda, o que indica a recirculação. A curva do produto do circuito não exibe características de distribuições influenciadas por saída antecipada de fluidos, porém a cauda é devido à recirculação. É possível observar que o tempo de permanência da fase líquida no circuito é elevado, sendo necessário um tempo superior a cinco vezes o de residência médio para que todo o traçador deixe o circuito.

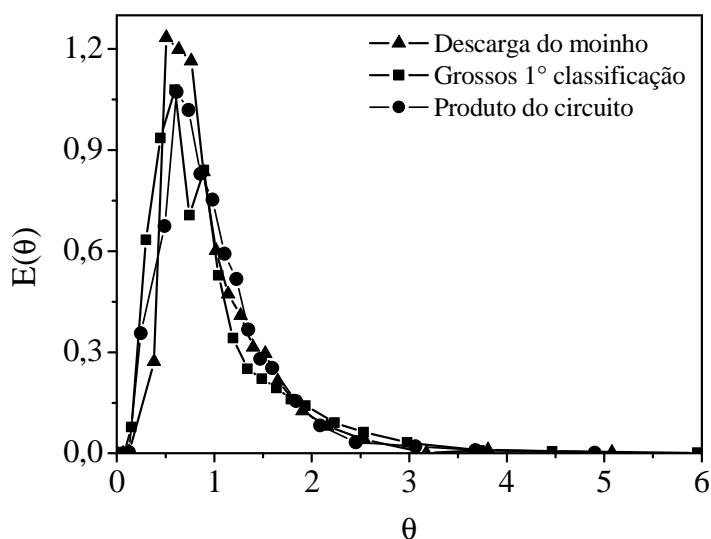


Figura 5 – Distribuições do tempo de residência adimensionais.

O modelo compartimentado, que se baseia na combinação de reatores ideais simples como misturadores perfeitos e reatores de fluxo pistonado, em diferentes arranjos e configurações, foi utilizado para ajustar a distribuição do produto do circuito. Um algoritmo foi implementado para ajustar o arranjo de reatores ideais à distribuição experimental  $E(t)$ , estimando os parâmetros e simulando a resposta do sistema usando o método dos mínimos quadrados (de Andrade Lima e Hodouin, 2005).

Vários arranjos de reatores foram avaliados para representar o padrão hidrodinâmico do circuito, porém o resultado mostrado é aquele que melhor ajustou aos dados experimentais com um número limitado de parâmetros e guarda correspondência física com o circuito estudado. A distribuição foi ajustada com o modelo utilizado para simular o circuito acrescido por um reator de fluxo pistonado, que representa o atraso da saída da fase líquida. A equação global, no domínio de Laplace, que descreve a dinâmica da fase líquida no processo, é dada por:

$$G_R(s) = G_d(s) \left[ \frac{(1 - \alpha)G_a(s) + \alpha\beta G_a(s)G_b(s)}{1 - (1 - \beta)\alpha G_a(s)G_b(s)} \right] \quad (1)$$

onde:

$$G_a(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s) \quad (2)$$

$$G_b(s) = G_5(s)G_6(s) \quad (3)$$

são as funções de transferência resultantes da associação do moinho com tanque 1 e do tanque 2 com o tanque 3, respectivamente;  $G_d(s)$  representa o atraso da saída do circuito;  $\alpha$  corresponde a partição da fase líquida na primeira classificação e  $\beta$  a partição na segunda classificação (ver Figura 2).

A Figura 6 apresenta o diagrama com os valores dos parâmetros ajustados e a Figura 7 mostra o resultado predito pelo modelo e a distribuição experimental obtida na saída do circuito de moagem-classificação.

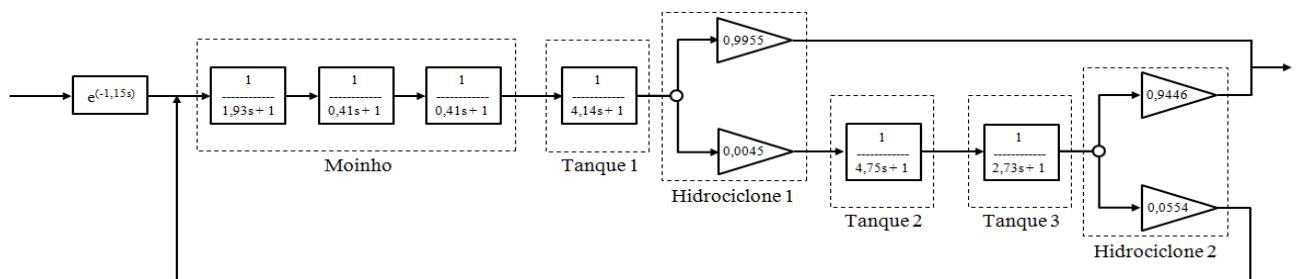


Figura 6 – Diagrama do circuito com os parâmetros ajustados.

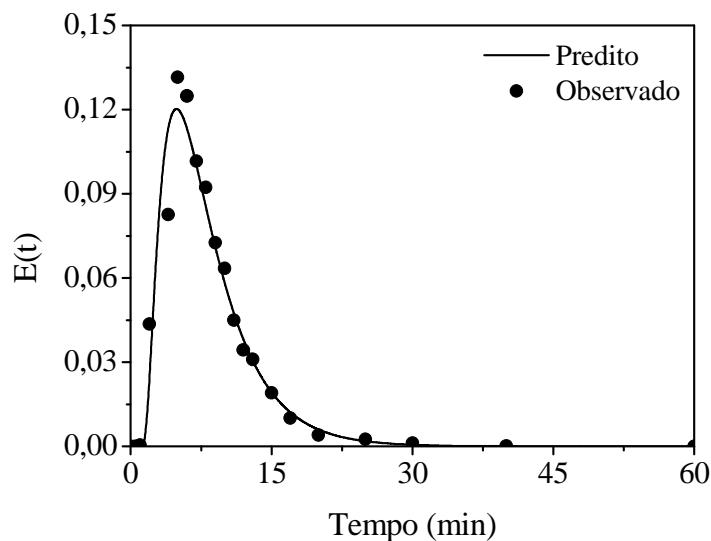


Figura 7 – DTR observada e predita pelo modelo da saída do circuito.

## 4. CONCLUSÕES

As distribuições de tempos de residência de um circuito industrial de moagem-classificação foram obtidas a partir de teste com traçador. Os resultados mostram que o tempo de residência médio da fase líquida no circuito é de 8,3 min e a variância da distribuição é de 65,7 min<sup>2</sup>. Esse resultado indica que apesar do tempo de residência médio do líquido no circuito ser pequeno, uma parcela do fluido permanece por maior período. As distribuições adimensionais obtidas para três diferentes pontos do circuito apresentam semelhanças nos padrões hidrodinâmicos. Um modelo composto por uma associação de misturadores perfeitos e dois reciclos foi usado para modelar a distribuição global do circuito.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Mineração Fazenda Brasileiro e aos Engenheiros Jeã de Lima Silva e Gabriel Sapucaia pelo apoio para a realização da parte experimental deste trabalho. Os autores agradecem ao Professor José Antonio Menezes Filho e Sergio S. Prado Oliveira (Laboratório de Toxicologia, Departamento de Farmácia da UFBA) pela realização das análises químicas do traçador.

## 6. REFERÊNCIAS

- AUSTIN, L.G., CONCHA, F., Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación, CYTED. 1993.
- AUSTIN, L.G., KLIMPEL, R.R., LUCKIE, P.T., Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1984.
- DANCKWERTS, P. V. Continuous flow systems. Distribution of residence times. *Chemical Engineering Science*, v. 2, p.1-13, 1953.
- DE ANDRADE LIMA, L.R.P.; HODOUIN, D. Residence time distribution of an industrial mechanically agitated cyanidation tank. *Minerals Engineering*, v.18, n. 6, p. 613-621, 2005.
- LEVENSPIEL, O. Chemical reaction engineering, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1999.
- KING, R. P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann, Boston, 2001.
- MAKOKHA, A. B.; MOYS, M. H.; BWALYA, M. M. Modeling the RTD of an industrial overflow Ball Mill as a function of load volume and slurry concentration. *Minerals Engineering*, v.24, p.335-340, 2011.
- NAOR, P.; SHINNAR, R. Representation and evaluation of residence time distributions. *Industrial Engineering Chemical Fundamentals*, v.2, p.278-286, 1963.