

## **AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DAS FASES LÍQUIDA E SÓLIDA EM COLUNAS DE FLOTAÇÃO COM TRAÇADORES RADIOATIVOS**

A.R. Santos (ars@cdtn.br), R.M. Moreira (rubens@cdtn.br), J.A. de Aquino (jaa@cdtn.br), A.F.O. Luz (afol@cdtn.br)

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN

Rua Mário Werneck S/N, Campus UFMG, Pampulha, 30123-970 Belo Horizonte, MG

### **RESUMO**

Neste trabalho foi realizado um estudo do comportamento de duas fases em uma coluna de flotação piloto através do uso da técnica dos traçadores radioativos. Isto permitiu a determinação da distribuição dos tempos de residência (DTR) para a fase líquida e sólida, sendo as medições nesta última realizadas em quatro diferentes frações granulométricas.

Foram feitas injeções pulsadas de traçador no fluxo de alimentação da coluna e registradas suas respostas na saída do rejeito (não-flotado) da coluna, o que possibilitou uma identificação direta da DTR da zona de coleta da coluna.

A DTR da fase líquida foi avaliada para diferentes condições de mistura na zona de coleta da coluna, sendo estas condições correlacionadas com a recuperação metalúrgica do processo. Os resultados obtidos foram comparados com modelos matemáticos disponíveis na literatura.

A influência da granulometria do minério no tempo de residência e no comportamento hidrodinâmico foi claramente observada.

Os resultados foram modelados utilizando-se diferentes condições de contorno.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coluna de flotação, traçadores radioativos, DTR, dispersão axial, modelamento

### **ABSTRACT**

Tests using gamma emitter radiotracers were carried in a pilot flotation column to quantify its dynamic behavior.

Accounting for the complex flow distribution pattern, the residence time distribution (RTD) of both the liquid and solid phases has been determined and compared. Since the solid particles exhibit a size distribution their hydrodynamic behavior may vary within the size range.

Pulse injections of the tracer at the feed flow generated a signal that was recorded by scintillation probes placed at the outer surface of the column, near the column entrance and in tailings exits. Hence the collection zone RTD's were identified under the same conditions without interfering with the flow.

The influence of the size distribution on the residence time and on the dispersion performance has been clearly demonstrated.

Liquid phase DTR's at different flow conditions were measured and the result were compared whit mathematic models proposed on literature. Its influence on the recovery yield was also evaluated.

The results supported an appraisal of the axial dispersion model usually employed to represent the flow. Different boundary conditions were verified and it could be shown that the divergence among then are of lesser importance for the Peclet numbers characteristic of column flotation practice.

**KEYWORDS:** Column flotation, radiotracers, RTD, dispersion, modeling.

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos autores têm utilizado o modelo da dispersão axial para descrever matematicamente as condições de transporte na zona de coleta de uma coluna de flotação (Dobby e Finch, 1985). Considerando-se o fluxo descendente da água ou das partículas minerais na zona de coleta da coluna, a equação de transporte de massa que descreve o transporte é:

$$D \frac{d^2c}{dx^2} - u_i \frac{dc}{dx} - \frac{dc}{dt} = 0 \quad (1)$$

Onde  $D$  é o coeficiente de dispersão axial [ $L^2.t^{-1}$ ] devido à turbulência e difusão molecular;  $u_i$  é a velocidade do líquido ou da partícula [ $L.t^{-1}$ ];  $x$  corresponde à direção axial da zona de coleta e  $c$  é a concentração de uma determinada fase (líquida ou sólida), ou de um determinado componente (em qualquer destas fases), ou ainda de um traçador num determinado tempo  $t$ .

A dispersão em um sistema atravessado por um fluxo de material pode ser quantificada através de um termo adimensional conhecido como número de Peclet ( $Pe$ ), definido por:

$$Pe = \frac{u_i L}{D} \quad (2)$$

Onde  $u_i$  é a velocidade característica de uma determinada fase;  $L$  é o comprimento característico e  $D$  é o coeficiente de dispersão axial, que pode ser obtido através de experimentos que fornecem dados relativos à distribuição de tempos de residência no sistema em estudo.

A condição de mistura em que se encontram as fases na zona de coleta de uma coluna de flotação é um fator preponderante para a recuperação do processo. Entende-se que quanto menor a turbulência melhor o desempenho da coluna. Essa condição de mistura da zona de coleta afeta tanto a coleta quanto o desprendimento da partícula mineral pela bolha. Um alto grau de mistura é, portanto, prejudicial ao desempenho do equipamento (Mavros, 1993).

Assumindo-se que a recuperação na zona de coleta de uma coluna de flotação obedece a uma cinética de primeira ordem, o rendimento dessa reação pode ser dado em função do número de Peclet, da constante cinética e do tempo médio de residência segundo as equações 3 e 4 com as condições de contorno fechado-fechado e aberto-fechado respectivamente:

$$R_c = 1 - \frac{4a \exp(P_c/2)}{(1+a)^2 \exp[(a/2)P_c] - (1-a)^2 \exp[(-a/2)P_c]} \quad (3)$$

Levenspiel, (1999)

$$R_c = 1 - \frac{1}{a} \exp\left[\frac{P_c}{2}(1-a)\right] \quad (4)$$

Villermaux, (1995)

onde

$$a = \sqrt{1 + 4K\bar{t}/P_c} \quad (5)$$

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Seleção dos traçadores

Para marcação da fase líquida foi escolhido como traçador o  $^{56}\text{Mn}$ , obtido pela ativação neutrônica de uma amostra de cloreto de manganês tetra hidratado ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ).

Na marcação da fase sólida o próprio minério fosfático proveniente do rejeito de um teste inicial na coluna foi utilizado como traçador. Foram marcadas quatro frações granulométricas (fina < 74  $\mu\text{m}$ , média > 74 < 210  $\mu\text{m}$ , grossa > 210  $\mu\text{m}$  e toda a fração granulométrica < 420  $\mu\text{m}$ ).

### 2.2 A coluna piloto

A coluna piloto é constituída de nódulos de acrílico com 10,2 cm de diâmetro interno com espessura da parede de 1,0 cm. A altura total da coluna é de 570,0 cm, sendo 167,0 cm do transbordo da fração flotada até o ponto da alimentação e 380 cm do ponto de alimentação até a entrada de ar na base da coluna.

### 2.3 Procedimento dos testes

Os testes de marcação da fase líquida foram realizados variando-se a taxa de alimentação de sólidos da coluna em 50, 75 e 100 Kg/h, mantendo constantes as outras condições operacionais da coluna.

Os testes de marcação das frações granulométricas da fase sólida foram realizados sobre essas mesmas condições operacionais e a uma taxa de alimentação de sólidos de 100 Kg/h. Para cada teste foram realizadas amostragens que permitiram o cálculo da recuperação metalúrgica do processo (recuperação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  apatítico).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após registradas as passagens dos traçadores, os dados normalizados foram ajustados aos modelos da dispersão axial aberto-fechado e fechado-fechado. Esses ajustes foram feitos através de interações matemáticas com os parâmetros e  $\bar{t}$   $Pe$ .

A Figura 1 apresenta os registros de algumas curvas  $E(t) \times t$  normalizadas obtidas pelas injeções de marcação das fases sólida e líquida bem como os modelos matemáticos ajustados. É possível visualizar que foi conseguido um ótimo ajuste em todas as injeções.

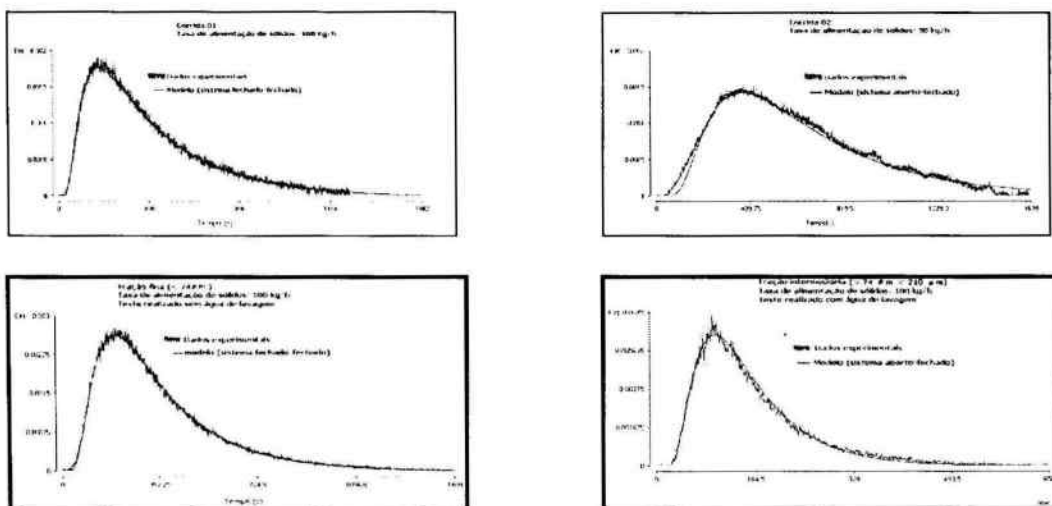


Figura 1- Curva de resposta normalizadas, da D.T.R na zona de coleta da coluna.

### 3.1 Testes de marcação da fase líquida

A Tabela I, a seguir lista os principais parâmetros obtidos ( $P_e$ ,  $\bar{t}$ ), através do ajuste dos dados experimentais aos modelos da literatura: Sistema fechado-fechado (S.F.F) e Sistema aberto-fechado (S.A.F).

Neste caso,  $\epsilon$  corresponde ao erro de ajuste normalizado entre o modelo e os dados experimentais obtido pelos mínimos quadrados entre as contagens experimentais e as modeladas.

Tabela I. Parâmetros obtidos com os testes de injeção da fase líquida

Q <sub>sólidos</sub>	Corridas	CC	$\bar{t}$ (s)	$P_e$	$\epsilon$
50 Kg/h	1	S.F.F	593	3,64	5,73E-05
		S.A.F	608	4,14	4,45E-05
	2	S.F.F	592	4,00	7,57E-05
		S.A.F	614	4,44	6,68E-05
75 Kg/h	1	S.F.F	530	2,62	4,36E-05
		S.A.F	554	3,02	4,04E-05
	2	S.F.F	509	3,00	6,46E-05
		S.A.F	531	3,22	5,30E-05
100 Kg/h	1	S.F.F	501	2,06	5,25E-05
		S.A.F	497	2,89	5,20E-05
	2	S.F.F	505	2,20	4,86E-05
		S.A.F	494	2,78	5,78E-05

#### 3.1.1 Efeito das condições de mistura na recuperação da zona de coleta da coluna

Conforme descrito anteriormente, recuperação na zona de coleta ( $R_c$ ) é função do tempo médio de residência, da constante cinética ( $K$ ) e das condições de mistura na zona de coleta da coluna, fato este ilustrado pela equação 1, a qual corresponde à solução da equação da dispersão axial para sistemas fechados.

Como a coluna apresenta duas seções com condições de transporte distintas (zona de coleta e camada de espuma), a recuperação metalúrgica de um dado mineral (recuperação global na coluna) ( $R_g$ ) é função da recuperação na zona de coleta ( $R_c$ ) e na camada de espuma ( $R_f$ ) da coluna, conforme descrito abaixo.

$$R_g = \frac{R_c \cdot R_f}{R_c \cdot R_f + 1 - R_c} \quad (6)$$

Dessa forma, através da recuperação global, obtida pelos teores do concentrado, rejeito e alimentação é possível determinar a recuperação na zona de coleta da coluna e correlacioná-la com os dados obtidos com os traçadores.

Conforme a literatura (YIANATOS e outros, 1998), a recuperação na camada de espuma ( $R_f$ ) é função da altura da camada de espuma ( $H_f$ ), da velocidade superficial de ar ( $V_{ar}$ ) e da velocidade superficial de água de lavagem ( $V_w$ ) através da seguinte relação empírica:

$$R_f = 95 \exp(-1,44 * 10^{-2} \frac{H_f (1 + 3V_w)}{V_{ar}^3}) \quad (7)$$

Correlacionando-se esta equação com as equações (3 e 6), através da média dos resultados dos testes de marcação da fase líquida, obtêm-se a recuperação na zona de coleta da coluna para os testes realizados.

Na Figura 2 (médias dos testes) é possível observar a influência da dispersão axial sobre a recuperação na zona de coleta, confirmando os conceitos discutidos na seção 1 deste texto.

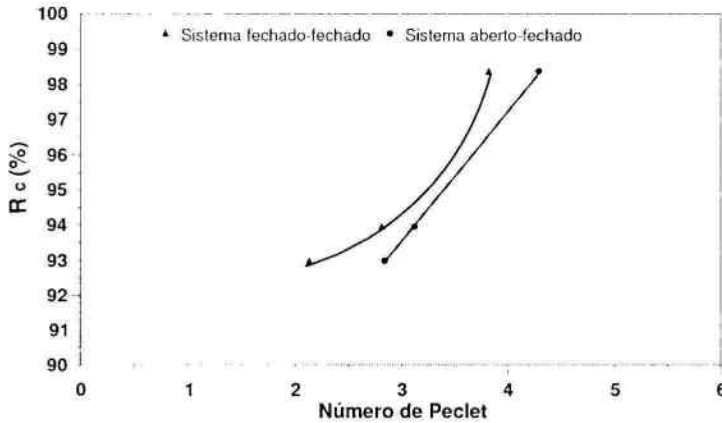


Figura 2- Efeito das condições de mistura sobre a recuperação na zona de coleta da coluna.

Nota-se que a recuperação aumenta à medida que o sistema tende para o perfeito fluxo de pistão ( $Pe \rightarrow \infty$ ), diminuindo quando este se aproxima do misturamento perfeito ( $Pe \rightarrow 0$ ). É importante frisar que mesmo tendo sido quantificada a dispersão axial da fase líquida na polpa nestes testes, é possível estender este comportamento à fase sólida, visto que ambos se encontram sobre as mesmas condições de mistura.

### 3.1.2 Comparação dos resultados com a literatura

Diversos autores têm formulado modelos empíricos para a determinação do coeficiente de dispersão axial, ou seja, prever o grau de mistura dos escoamentos em colunas de flotação. Abaixo são apresentados os modelos matemáticos de alguns autores que quantificaram a dispersão em função da velocidade superficial e descida do líquido  $V_l$  (cm/s) e de outros parâmetros como: velocidade superficial do ar ( $V_{ar}$ ), diâmetro da coluna ( $d_c$ ), e altura da zona de coleta ( $L$ )

1. XU & FINCH, (1991)

$$N_d = \frac{D}{u_t L} = 1.85 \left[ \left( \frac{d_c}{L} \right) \left( \frac{V_{ar}}{V_l} \right) \right]^{-0.63} \quad (7)$$

2. MANKOSA e outros, (1992)

$$Pe = \frac{uL}{D} = 0.7 \left[ \left( \frac{L}{d_c} \right)^{0.63} \cdot \left( \frac{V_l}{V_{ar}} \right)^{0.5} \right] \quad (8)$$

3. MAVROS & DANILLIDOU (1993)

$$N_d = 0,0194 \exp(0,267 d_c) V_l \quad (9)$$

Quando estes modelos são comparados aos experimentais, através da quantidade adimensional  $Pe$ , apenas no modelo desenvolvido por MAVROS & DANILLIDOU (1993) observa-se um comportamento semelhante aos resultados experimentais; ou seja:  $Pe$  decresce com o aumento da vazão de polpa e conseqüentemente com o aumento da velocidade superficial de descida do líquido (VI).

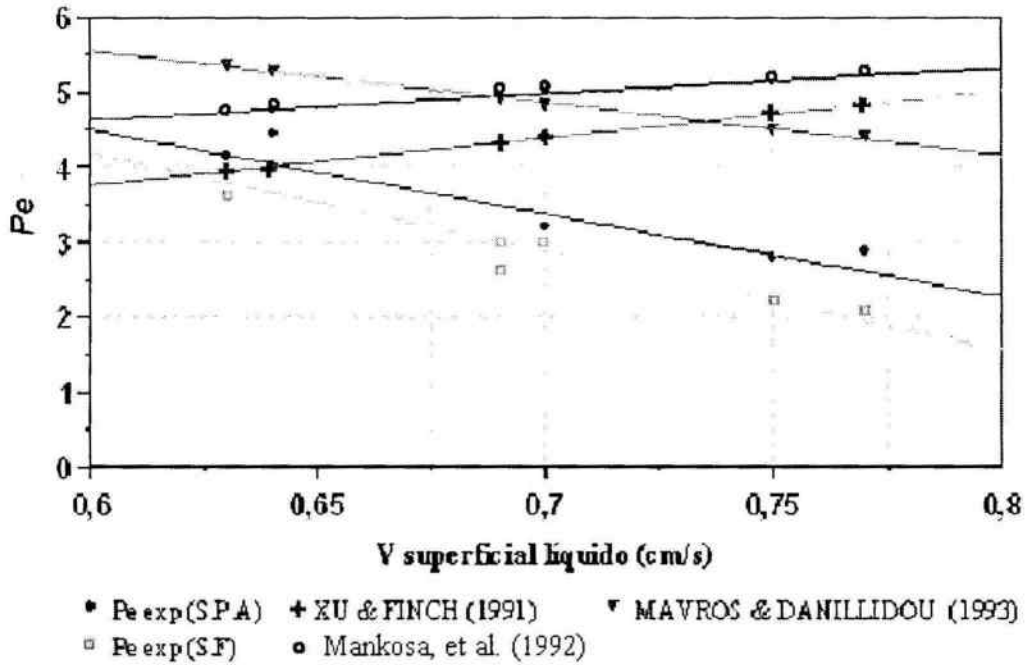


Figura 3- Comparação entre os números de Peclet obtidos experimentalmente e os obtidos pela literatura.

Isto demonstra que os modelos de Xu & Finch (1991) e de Mankosa, et al (1992) não levam devidamente em conta a influência da hidrodinâmica sobre as condições de mistura na zona de recuperação da coluna. (vide Figura 3)

### 3.2 Testes de marcação da fase sólida

A Tabela II a seguir apresenta os parâmetros obtidos com as corridas e com a modelagem realizada.

Tabela II- Resultados dos testes com marcação da fase sólida

Fração granulométrica	C C	$\bar{t}$ (s)	Pe	$\epsilon$
Fina (< 74 $\mu\text{m}$ )	S.F	280,0	3,88	6,61E-05
	S.A	280,1	4,41	6,06E-05
Média (>74, < 210 $\mu\text{m}$ )	S.F	154,0	4,78	1,88E-04
	S.A	153,0	5,78	1,95E-04
Grossa (> 210 $\mu\text{m}$ )	S.F	79,8	6,90	8,34E-04
	S.A	79,4	7,60	8,42E-04
Toda a fração	S.F	204,0	2,31	1,48E-04
	S.A	207,0	2,95	1,48E-04

#### 3.2.1 Influência da granulometria sobre a dispersão

Como esperado, o tempo médio de residência das partículas é inversamente proporcional ao tamanho médio destas. Entretanto, em se tratando de comportamento fluidodinâmico, é claramente observado o melhor comportamento das partículas mais grossas em relação às mais finas. (vide Figura 4)

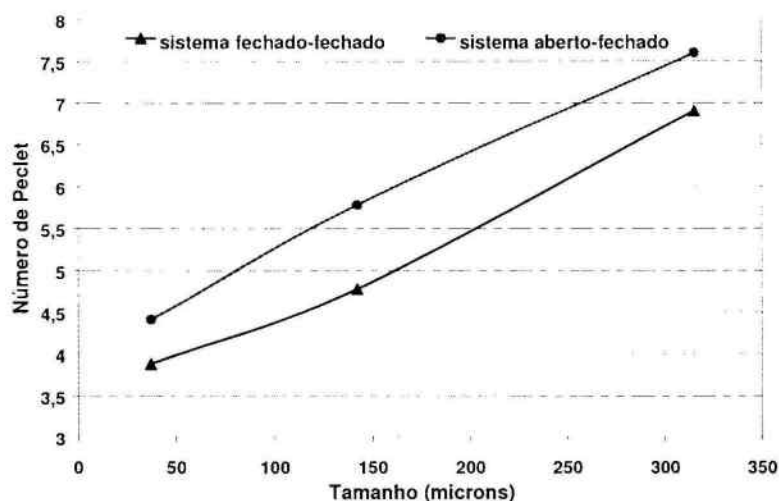


Figura 4- Relação entre a granulometria e a dispersão axial na zona de coleta da coluna.

Dessa forma, pode-se concluir que a fração grossa apresenta um melhor comportamento fluidodinâmico em se tratando de dispersão axial, enquanto que a fina apresenta um tempo médio de residência mais propício a uma melhor recuperação.

É extremamente trabalhoso provar experimentalmente essa tendência em uma coluna de flotação, uma vez que além desses dois fatores ( $Pe$  e  $\bar{t}$ ), a recuperação é também função do grau de liberação, e conseqüentemente, da hidrofobicidade da partícula, os quais também variam com a granulometria.

### 3.2.2 Relação entre a amplitude da faixa granulométrica e a dispersão

Além dos testes com a marcação exclusiva de cada uma das três frações granulométricas descritas anteriormente, também foi efetuado um teste em que todas as faixas granulométricas foram marcadas simultaneamente. Neste teste pôde ser constatado que a dispersão da fase sólida foi maior se comparada às corridas nas quais se tinha marcado frações de menor amplitude granulométrica (vide Figura 5).

Este fato é explicado pelo comportamento hidrodinâmico distinto das partículas com diferentes tamanhos médios que compõem o minério. A dispersão global obviamente aumenta à medida que aumenta a amplitude da granulometria.

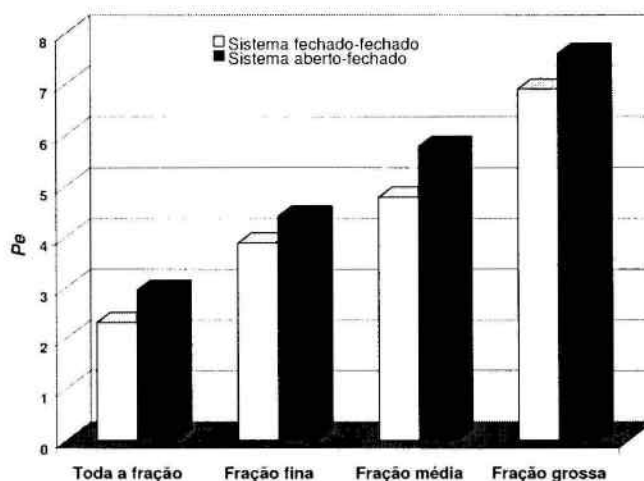


Figura 5- Relação entre as faixas granulométricas e o número de Peclet.

Diante desta comprovação, e supondo constantes hidrofobicidade e grau de liberação das partículas, uma redução na amplitude da faixa granulométrica que alimenta a coluna acarretaria em um aumento na recuperação da zona de coleta e, conseqüentemente, na recuperação global do processo.

#### 4. CONCLUSÕES

Em termos qualitativos, ambos os sistemas fechado-fechado e aberto-fechado podem ser utilizados para modelar matematicamente as condições de transporte da zona de coleta de uma coluna de flotação.

O aumento da vazão de polpa que alimenta a coluna resulta em um acréscimo do grau de mistura axial na zona de coleta da coluna e em um decréscimo do tempo médio e passagem da polpa, cujos resultados somados resultam em uma perda na recuperação metalúrgica do processo.

Dentre os modelos empíricos aqui discutidos, o que melhor representa as condições hidrodinâmicas na zona de coleta da coluna é o modelo elaborado por MAVROS & DANILLIDOU (1993).

Partículas maiores apresentam um melhor comportamento fluidodinâmico. Contudo as partículas menores apresentam um tempo de residência mais propício á recuperação do mineral.

Quanto maior a amplitude da fração granulométrica da alimentação da coluna, maior a dispersão axial das partículas minerais na zona de coleta a coluna.

#### 5. REFERÊNCIAS

- DOBBY, G.S.; FINCH, J.A., Mixing characteristics of industrial flotation columns. *Chemical Engineering Science*, v. 40, n.7, p. 1061-1068, 1985.
- MANKOSA, M. J.; LUTTRELL, G.H.; ADEL, G.T.; YOON, R.H., A study of axial mixing in colum flotation. *International Journal of Mineral processing*, v.35, p. 51-64, 1992.
- MAVROS , P.; DANILIDOU, A., Mixing in flotation columns: Liquid-phase residence time distributions studies. *Minerals Engineering*, v. 6, p. 707-719, 1993.
- MAVROS, P., Mixing in flotation columns: axial dispersion modeling. *Minerals Engineering*, v.6, p. 465-478, 1993.
- YIANATOS, J.B.; BERGR, L.G; CORTÉS, G.A., Froth zone modeliling of na industrial flotation column. *Minerals Engineering*, v.11, p.423-435, 1998.
- LEVENSPIEL, O., *Chemical Reaction Engineering*, 3rd. ed. New York: J Wiley, 1999 P. 293-312.
- VILLERMAUX, J., *Génie de la réaction chimique*. 2éme. Ed. Tec & Doc Lavoisier, Paris, 1995 XU, M.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R., Numerical solution to axial dispersion model in flotation column studies. *Canadian Metallurgical Quartely*, v.30, p. 71-77, 1991.