

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE COLUNA DE FLOTAÇÃO

NETO, D.J.¹, HORTA, D.G.², MATIOLO, E.³, RODRIGUES, J.F.P.⁴,
BERGERMAN, M.G.⁵

¹Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail: dimasnetosri@gmail.com

²Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail: daniela.horta@unifal-mg.edu.br

³Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), e-mail: ematiolo@cetem.gov.br

⁴Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail: jeisapr@hotmail.com

⁵Universidade de São Paulo (USP), e-mail: mbergerman@usp.br

RESUMO

As colunas de flotação são largamente utilizadas nas operações industriais de concentração de minérios, especialmente na flotação de finos e em etapas de limpeza. O objetivo deste trabalho foi caracterizar hidrodinamicamente uma coluna de flotação de 7,2 cm de diâmetro interno por 280 cm de altura. Inicialmente, a vazão de ar de referência ($Q_g = 400 \text{ dm}^3/\text{h}$, $J_g = 2,72 \text{ cm/s}$) correspondente à mudança de regime *bubbly flow* para turbulento foi determinada. Em seguida, foram conduzidos ensaios de flotação reversa de minério de ferro com diferentes valores de vazão de ar (150, 400 e 500 dm^3/h), mantendo-se as vazões de alimentação e remoção do rejeito fixas. Em tais ensaios houve variação da vazão de água de lavagem com o intuito de manter-se a velocidade superficial de Bias em 0,05 cm/s. Os números adimensionais encontrados, Reynolds (N_{RE}), Froude (N_{FR}) e Peclet (N_{PE}), que caracterizam a transição de regime (*bubbly flow* para turbulento) são de aproximadamente 2.000, 1×10^{-3} e 2, respectivamente. O teor máximo de Fe obtido ficou em torno de 64% nos ensaios com J_g de 1,02 e 2,72 cm/s. Para valores de N_{RE} e N_{FR} maiores do que o valor de transição e N_{PE} menor do que o valor de transição houve redução no teor de ferro.

PALAVRAS-CHAVE: coluna de flotação; hidrodinâmica; minério de ferro.

ABSTRACT

The flotation columns are largely used in the industrial operations of ore concentration, especially in fine particles flotation and cleaner or scavenger steps. The objective of this work was hydrodynamic characterization a flotation column with 7.2 cm of internal diameter and 280 cm of height. Initially, the gas flow reference ($Q_g = 400 \text{ dm}^3/\text{h}$, $J_g = 2.72 \text{ cm/s}$) that corresponds to the regime change from bubbly flow to turbulent was determined. Then, reverse flotation of iron ore experiments were carried out with different gas flow values (150, 400 e 500 dm^3/h), keeping constant feed and tailing removal flows. In these experiments the wash water flow varied in order to keep constant the superficial Bias rate of 0.05 cm/s. The found non-dimensional numbers, Reynolds (N_{RE}), Froude (N_{FR}) and Peclet (N_{PE}), that characterize the regime transition (from bubbly flow to turbulent) are approximately 2.000, 1×10^{-3} and 2, respectively. The maximum obtained Fe content was around 64% in the tests with J_g of 1.02 and 2.72 cm/s. For N_{RE} and N_{FR} greater than the transition value and N_{PE} lesser than the transition value was reduced in iron content.

KEYWORDS: column flotation; hydrodynamic; iron ore.

1. INTRODUÇÃO

Na flotação em coluna, o regime de fluxo interno é governado pela velocidade superficial do ar (J_g). Com um aumento deste parâmetro, estruturas de fluxo tendem para tipos complexos com formação de múltiplos vórtices como no regime *churn turbulent flow*. Tal regime é caracterizado por bolhas de tamanhos heterogêneos, em que as bolhas maiores se deslocam com altas velocidades de ascensão, o que causa instabilidade na estrutura do fluxo, que descreve um comportamento oscilatório fluindo ora para cima e ora para baixo. Esta instabilidade é resultante da paridade relativa da gravidade e das forças de cisalhamento que agem em direções opostas sobre as bolhas. Por outro lado, em baixas velocidades superficiais do ar, observa-se o desenvolvimento do regime *Bubbly flow*, caracterizado por um fluxo homogêneo de tamanhos de bolhas distribuídas uniformemente ao longo da área transversal da coluna. Estas bolhas apresentam diâmetros pequenos com geometria esférica e velocidade de ascensão constante (SHAH *et al.*, 1982; DOBBY, 1990; FINCH; DOBBY, 1991; CHAKRABORTY *et al.*, 2009).

A velocidade superficial de ar é um parâmetro essencial para controlar a disponibilidade de superfície de bolha. Ityokumbul (1993) estabeleceu uma relação entre a velocidade máxima de ar ($J_{g,max}$), para a existência do regime *bubbly flow*, e o diâmetro da coluna D_c (Equação 1).

$$J_{g,max} = 0,109D_c^{0,5} \quad (1)$$

Do ponto de vista operacional é mais adequado que a coluna trabalhe em regime *bubbly flow*, pois partículas e bolhas desenvolvem movimentos individuais em contracorrente (bolhas ascendem pelo empuxo e partículas sedimentam pela gravidade), promovendo a colisão entre estas espécies. Uma vez que o contato entre as três fases (sólido, ar e líquido) for estabelecido, a destruição do agregado partícula/bolha pode ocorrer mediante a ação de um fator externo, neste caso a energia de campo turbulento. Deste modo, o agregado capturado em um redemoinho turbulento, gira com frequência proporcional ao seu tamanho e se, a energia cinética adquirida pela partícula for maior que o trabalho de ruptura, o agregado se rompe (RODRIGUES, 2010). Por esse motivo, os vórtices do regime *churn turbulent flow* são indesejáveis na operação da coluna.

A caracterização hidrodinâmica de um sistema físico pode ser feita pela análise dos números adimensionais, os quais podem se referir ao macro ou micro sistema, dependendo das dimensões consideradas. Os adimensionais utilizados neste trabalho estão expressos na Tabela 1 (LEAL FILHO, 2007).

Tabela 1. Adimensionais de interesse para a flotação colunar utilizados.

NÚMEROS	EQUAÇÃO	INTERPRETAÇÃO FÍSICA
Reynolds	$N_{Re} = LV\rho\mu^{-1} \quad (02)$	$\frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}}$
Froude	$N_{Fr} = L^{-1}V^2g^{-1} \quad (03)$	$\frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças gravitacionais}}$

Peclet	$N_{Pe} = 0,6 \left(\frac{H_c}{D_c} \right)^{0,63} \left(\frac{J_t}{J_g} \right)^{0,5} \quad (04)$	$\frac{\text{Segregação}}{\text{Dispersão}}$
--------	--	--

Em que: L é a dimensão linear que caracteriza o sistema; V é a velocidade escalar que caracteriza o sistema; ρ é a densidade de uma fase que caracteriza o sistema; μ é a viscosidade do fluido; g é a aceleração da gravidade; J_g e J_t são as velocidades superficiais do ar e da polpa no *underflow* da coluna; D_c e H_c são o diâmetro e altura da coluna, respectivamente (LEAL FILHO, 2007).

Se $N_{Re} < 1000$, o regime é classificado como laminar, no entanto se $1000 < N_{Re} < 3000$ há transição de regime de fluxo, enquanto que para $N_{Re} > 3000$, o regime é turbulento. Quando $N_{Fr} < 1$, as partículas sedimentam em ação ao peso e/ou são centrifugadas, enquanto que as bolhas ascendem e/ou são centrifugadas. Contudo se $N_{Fr} > 1$, bolha e partícula são arrastadas pelo fluido incorporando-se ao mesmo com a perda de seus movimentos individuais (FINCH; DOBBY, 1990; LEAL FILHO, 2007).

Com relação ao N_{Pe} , quando a coluna opera como um reator pistonado, existe um gradiente de concentração das partículas hidrofóbicas ao longo do eixo da coluna (máxima segregação) e o N_{Pe} tende ao infinito. Entretanto, se a coluna opera como um misturador perfeito, o N_{Pe} tende a zero e existe a máxima dispersão das partículas ao longo do eixo do reator. Nesta situação a concentração das partículas é a mesma em qualquer ponto da zona de coleta (FINCH; DOBBY, 1990; LEAL FILHO, 2007).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Preparação da amostra

A amostra de minério de ferro, doada pela Companhia Vale S/A, foi coletada na alimentação da flotação do circuito de Timbopeba. A amostra foi seca (90°C), classificada (1,18 mm) e o passante foi utilizado nos ensaios de concentração. A amostra foi caracterizada quanto a sua distribuição granulométrica, grau de liberação (análise de contagem de grãos) e composição química (Fluorescência de raios-X).

2.2. Coluna piloto de flotação

Os experimentos de flotação foram conduzidos em coluna piloto, que apresenta 7,2 cm de diâmetro interno por 280 cm de altura, volume de 11,5 dm³ e é construída em módulos de tubo de acrílico unidos por flange. O aerador empregado é do tipo interno (tubo cerâmico) e possui uma área superficial porosa de 254,5 cm². O sistema conta com rotâmetros para medida e controle das vazões de ar e água de lavagem. Para a determinação do *hold-up* do ar são utilizados manômetros de coluna d'água instalados na zona de coleta, numa seção de 65 cm próxima a base da coluna. Duas bombas peristálticas são responsáveis pelo bombeamento de polpa de alimentação e remoção do afundado.

Antes de alimentar a coluna o minério foi empalpado e condicionado em um tanque agitado com 0,68 m de altura e 0,44 m de diâmetro que opera impelidor de 0,13 m de diâmetro do tipo turbina com quatro pás inclinadas a 45°.

2.3. Seleção das vazões de ar e de água de lavagem

Primeiramente determinou-se experimentalmente a vazão de referência para o fluxo de ar. Depois, adotou-se um valor superior e outro inferior a esta vazão, como condição para os testes seguintes. Em seguida determinaram-se as vazões de água de lavagem em função das vazões de ar adotadas.

Shukla *et al.* (2010) demonstraram que o J_g de transição do regime de fluxo permanece constante independente da quantidade de sólidos, sendo o mesmo para sistema bifásico e trifásico. Assim, o perfil de *hold up* do ar em função do J_g foi confeccionado, para o sistema bifásico, e utilizado para identificar a vazão de ar de referência a partir da qual ocorre a mudança de regime. O *hold up* (ε_g) foi determinado conforme a Equação 5 para vazões de ar variando de 100,01 a 799,99 dm³/h. Para cada valor de vazão de ar, a diferença entre os níveis dos manômetros (ΔH) foi medida e utilizada para o cálculo de ε_g .

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

Em que L é a distância entre as tomadas de pressão (fixa em 65 cm).

Incrementos na vazão de ar exigem alterações na vazão de água de lavagem para que o bias permaneça positivo e constante. Assim, empregou-se a Equação 6 proposta por Luttrell e Yoon (1990), para o cálculo da velocidade superficial de água de lavagem (J_w) de forma a manter o bias (J_b) positivo em 0,05 cm s⁻¹ a cada situação de fluxo de ar adotada. Admitiu-se um *hold up* de ar na zona de espuma (ε_f) de 0,95 (valor típico).

$$\varepsilon_f = \frac{J_g}{J_g + J_w - J_b} \quad (3)$$

2.4. Ensaios *rougher* na coluna piloto

Os reagentes utilizados para flotação de minério de ferro foram: amina (EDA-C® da Clariant) como coletor de silicatos, na dosagem de 120 g/t de SiO₂ e amido de milho (Amidex® da Ingredian) gelatinizado com NaOH como depressor de hematita na dosagem de 600 g/t. As dosagens foram as mesmas utilizadas industrialmente no circuito de flotação de Timbopeba. Os valores das vazões de ar e água de lavagem utilizados nos ensaios realizados são observados na Tabela 2.

Após a coluna entrar em regime, amostras de concentrado e de rejeito foram coletadas simultaneamente durante 1 minuto. Para cada ensaio foram executadas duas rotinas de amostragem. As amostras coletadas foram secas em estufa, pesadas e analisadas quanto ao teor de Fe. A composição química da alimentação era de 43,6% de Fe e 34,5% de SiO₂. Os demais constituintes representavam menos de 2% da amostra.

Tabela 2. Resumo dos ensaios realizados.

Ensaio	J_b (cm s ⁻¹)	Vazão ar (dm ³ h ⁻¹)	Vazão água (dm ³ h ⁻¹)	Vazão alimentação (dm ³ h ⁻¹)	Vazão afundado (dm ³ h ⁻¹)
01	0,05	150	15	54	42
02	0,05	400	28	54	42
03	0,05	500	34	54	42

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfil de *hold up* do ar em função do J_g (para o sistema ar – água) está representado na Figura 1. O J_g de 2,72 cm/s foi adotado como referência, uma vez que corresponde ao valor a partir do qual o perfil de $\varepsilon_g = f(J_g)$ deixa de ser linear. De acordo com Shukla *et al.* (2010) este comportamento define a transição entre os regimes *bubbly flow* e turbulento.

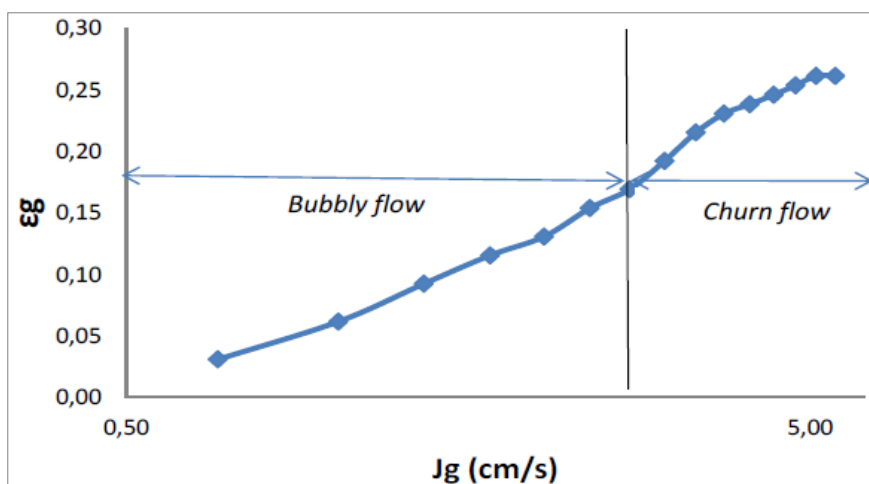


Figura 1. Variação do *hold up* em função do J_g para o sistema bifásico água/ar.

Imagens do regime de fluxo de ar no sistema bifásico comprovam que a transição do regime de fluxo *bubbly flow* para turbulento ocorre em J_g de aproximadamente 2,72 cm/s (Figura 2). Com valores de J_g inferiores a 2,72 cm/s a distribuição de bolhas é homogênea com tamanhos uniformes. A partir de $J_g = 2,72$ cm/s as bolhas se tornam instáveis, de tamanhos variados, heterogeneamente distribuídos ao longo da seção da coluna. Vale ressaltar que essa constatação foi realizada pela observação da variação dos tamanhos de bolhas e nenhuma determinação de diâmetro de bolha foi conduzida.

Para a confirmação do valor do J_g de transição, utilizou-se a Equação 1, a qual resultou em um J_g máximo de 2,92 cm/s, que é muito próximo daquele obtido graficamente (Figura 1). As outras vazões selecionadas foram de 150 dm³/h e 500 dm³/h. A vazão de água de lavagem correspondente a cada vazão de ar foi obtida por meio da Equação 6, de modo que velocidade superficial de bias fosse constante (0,05 cm/s).

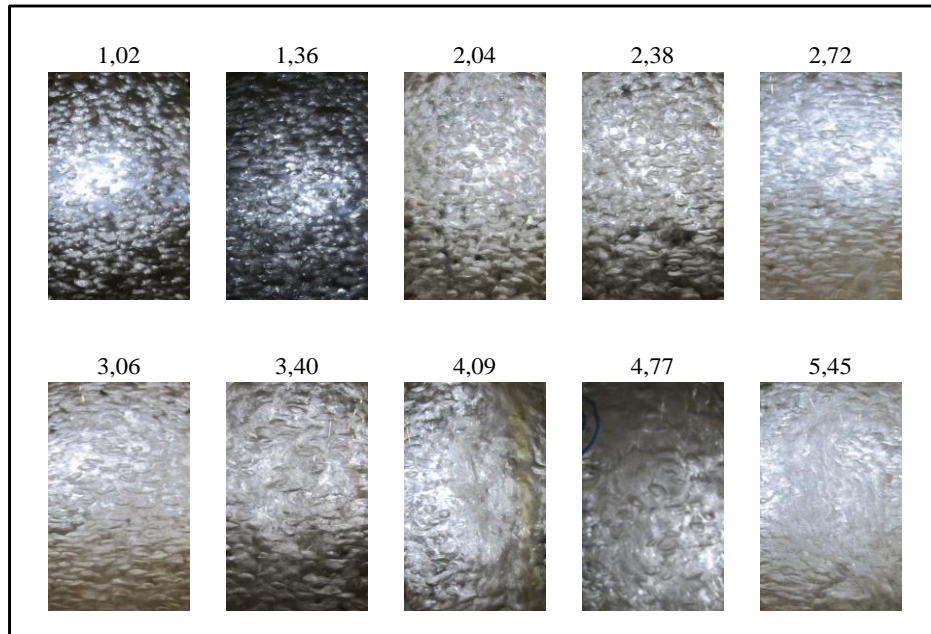


Figura 2. Imagens do fluxo de bolhas na coluna em sistema bifásico com diversos valores de J_g em cm/s (valor acima de cada imagem).

No que concerne aos ensaios de concentração, a variação de teor de Fe no concentrado com a velocidade superficial do ar é ilustrada na Figura 3. Observa-se que não há variação significativa de teor de Fe para valores de J_g inferiores ao valor de transição ($2,72 \text{ cm s}^{-1}$). Por outro lado, uma redução de teor (63,8 para 61,9%) é observada para valores superiores ao valor de transição.

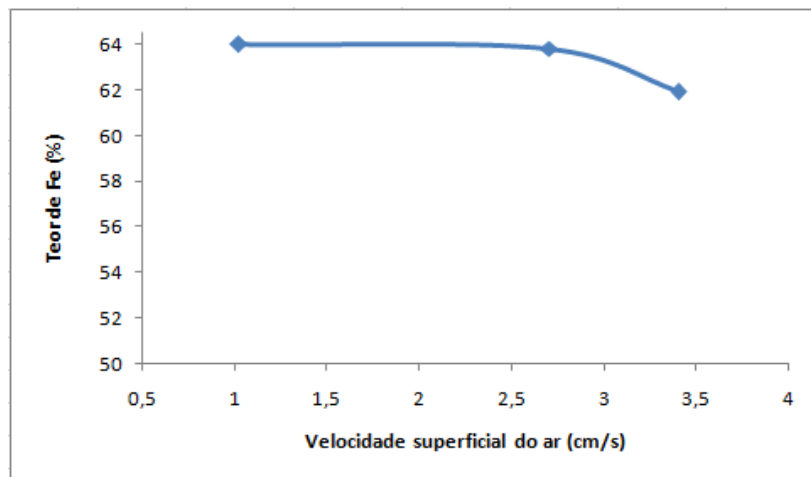


Figura 3. Influência do J_g no teor de Fe no concentrado.

Uma análise da relação entre o teor de Fe no concentrado e os números hidrodinâmicos adimensionais foi realizada. O número N_{Re} , N_{Fr} e N_{Pe} foram calculados por meio das Equação 2, 3 e 4, respectivamente. Conforme a Figura 4 (A), verifica-se uma tendência de redução do teor de Fe para valores de N_{Re} superiores a 2.000. Acima deste valor existe o predomínio das forças inerciais em relação às viscosas, caracterizando excesso de turbulência para o sistema, que age no sentido de destruir o agregado partícula-bolha.

Com relação ao N_{Fr} a dimensão L utilizada foi o diâmetro da coluna D_c . Observa-se na Figura 4 (B), que há uma redução no teor de Fe quando N_{Fr} é superior a $1,0 \times 10^{-3}$. Este resultado indica que existe excesso de aeração para N_{Fr} acima deste valor, comprometendo o desempenho da flotação provavelmente devido à turbulência no sistema. Ityokumbul (1993) reportou que a transição do regime *bubbly flow* para turbulento ocorre em $N_{Fr} = 1,23 \times 10^{-3}$ para coluna de 6,0 cm de diâmetro, valor condizente ao encontrado.

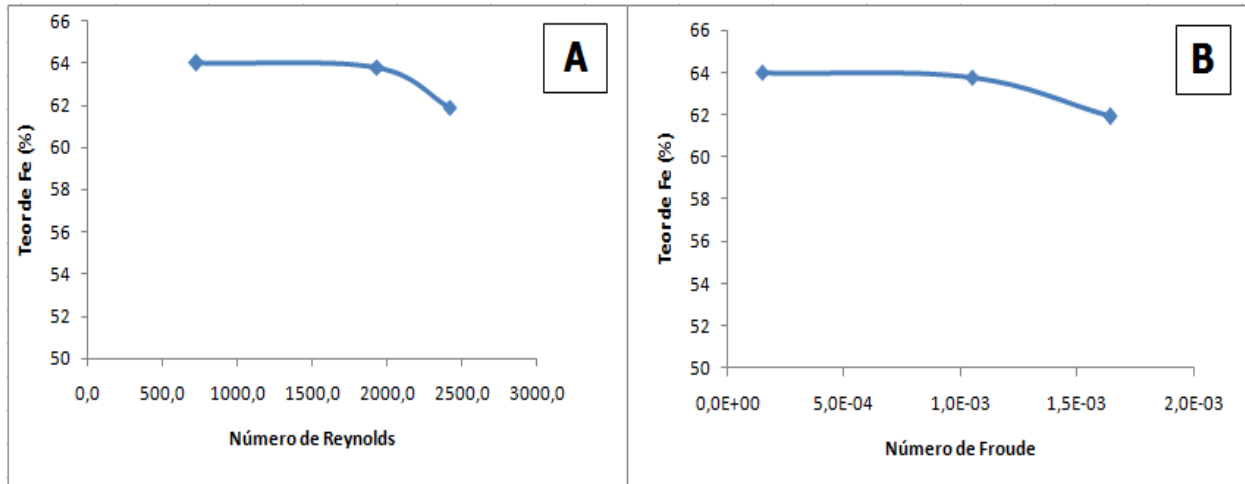


Figura 4. (A) Influência do Número de Reynolds no teor de Fe no concentrado. (B) Influência do Número de Froude no teor de Fe no concentrado.

De acordo com a Figura 5, o teor de Fe aumentou com o N_{Pe} . Este resultado é explicado pelo fato de que quanto maior é o N_{Pe} , mais proeminente é o gradiente de concentração de partículas hidrofóbicas ao longo da coluna, que opera como um reator pistonado. Portanto, maior é o desempenho da flotação. Dessa forma, a segregação deve predominar em relação a mistura para valores de N_{Pe} maior que 2.

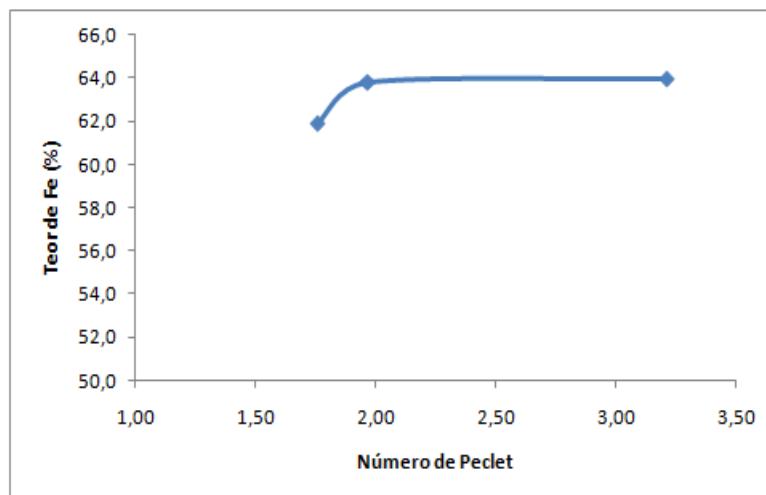


Figura 5. Influência do Número de Peclet no teor de Fe do concentrado.

4. CONCLUSÕES

No sistema bifásico (água-ar) determinou-se que a transição de regime de fluxo *bubbly flow* para turbulento, na coluna estudada, ocorre em valor de J_g de 2,72 cm/s. Os números adimensionais N_{Re} , N_{Fr} e N_{Pe} que caracterizam a transição de regime são de aproximadamente 2.000, 1×10^{-3} e 2, respectivamente. Ressalta-se a necessidade de conduzirem-se ensaios com um maior número de valores de vazão de ar para reforçar os resultados sugeridos por este trabalho e confirmar as discussões realizadas. O teor máximo de Fe obtido ficou em torno de 64% nos ensaios com J_g de 1,02 e 2,72 cm/s. Para valores de N_{Re} e N_{Fr} maiores do que o valor de transição e N_{Pe} menor do que o valor de transição houve redução no teor de ferro.

5. AGRADECIMENTOS

A empresa Vale S/A, unidade Timbopeba pelo fornecimento da amostra de minério de ferro e a Mineração Curimbaba pelas análises de FRX.

6. REFERÊNCIAS

CHAKRABORTY D, GUHA M, BANERJEE PK. CFD simulation on influence of superficial gas velocity, column size, sparger arrangement, and taper angle on hydrodynamics of the column flotation cell. Chem. Eng. Comm., 196: 1102–1116, 2009.

FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. Column Flotation. 1st ed., Pergamon; 1st edition, 198 p. 1990.

FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. Column flotation: A selected review. Part I. International Journal of Mineral Processing, v. 33, p. 343-354, 1991.

ITYOKUMBUL MT. Maximum gas velocity in column flotation. Minerals Engineering, v. 6, n.12, p. 1279 – 1286, 1993.

LEAL FILHO LS. Flotação. Belo Horizonte, 2007 (Apostila didática/TTE - Treinamento Técnico Especializado Ltda).

LEAL FILHO LS. Hidrodinâmica de sistemas de flotação. São Paulo, 2009 (Notas de Aula).

LUTTERLL GH, YOON RH. A flotation column simulator based on hydrodynamic principles. International Journal of Mineral Processing. 33. p. 355 – 368. 1990.

RODRIGUES WJ. Mecanismo de flotação de partículas grossas em células mecânicas: influencias das variáveis hidrodinâmicas e suas implicações cinéticas. [Tese de Doutorado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; 2010.

SHAH YT, KELKAR BG, GODBOLE SP. Design Parameters Column Reactors Estimations for Bubble. AIChE Journal; v. 28, n. 3, p. 353 – 379, 1982.

SHUKLA SC, KUNDU G, MUKHERJEE D. Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal. Minerals Engineering; v. 23.p 636–642, 2010.