

## FLOTAÇÃO DE APATITA EM CÉLULAS MECÂNICAS: INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS NA RECUPERAÇÃO DE PARTÍCULAS GROSSAS

Henrique Alves Graziel<sup>1</sup>, Wendel Johnson Rodrigues<sup>2</sup>, Laurindo de Salles Leal Filho<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av Professor Mello Moraes, 2373 – Cidade Universitária, CEP 05508-900 São Paulo-SP.  
E-mail: <sup>1</sup>henrique.graziel@poli.usp.br; <sup>2</sup>wjrodrigues@usp.br; <sup>3</sup>lauleal@usp.br

### RESUMO

Este trabalho objetiva contribuir para um melhor entendimento da importância da hidrodinâmica na flotação de partículas grossas de apatita (diâmetro de partícula  $d_p \geq 0,25\text{mm}$ ). Ensaios de microflotação foram conduzidos com apatita (ângulo de contato  $\approx 85-88^\circ$ ) na presença de oleato de sódio (100 mg/l) em  $\text{pH}=10,5$  versus número de Froude (Fr), número de Reynolds (Re) e energia média dissipada ( $\epsilon$ ). Os resultados mostraram máxima recuperação ( $R > 90\%$ ) quando  $0,3 < \text{Fr} < 0,8$ ;  $\text{Re} \approx 4 \times 10^3$  e  $\epsilon \approx 0,1\text{W/kg}$ . Para condições hidrodinâmicas mais quiescentes ( $\text{Fr} < 0,3$ ;  $\text{Re} < 4 \times 10^3$  e  $\epsilon < 0,1\text{W/kg}$ ), a recuperação de apatita decresceu devido ao fato de grande número de partículas se encontrarem sedimentadas (carência de suspensão) enquanto que para condições hidrodinâmicas mais severas ( $\text{Fr} > 2,0$ ;  $\text{Re} > 10^4$  e  $\epsilon > 1,0\text{W/kg}$ ) a recuperação foi quase nula devido à destruição do agregado apatita-bolha.

PALAVRAS-CHAVE: flotação, partículas grossas, apatita, hidrodinâmica, células mecânicas.

### 1. INTRODUÇÃO

Estima-se que 0,2 milhão ton/ano de apatita grossa (diâmetro  $> 0,10\text{mm}$ ) sejam perdas nas 5 maiores usinas brasileiras de flotação de fosfato. Como consequência, temos a queda de produtividade dessas usinas e o aumento da geração de resíduos sólidos (rejeitos) que são dispostos no meio ambiente.

A prática industrial do processo de flotação tem mostrado que partículas de um minério, embora submetidas às mesmas condições físico-químicas (pH, concentração de reagentes, temperatura e tensão superficial), apresentam desempenho diferenciado em função de sua granulometria, como ilustrado na figura 1. As baixas recuperações de apatita grossa observadas podem estar associadas a uma liberação deficiente ou a condições hidrodinâmicas desfavoráveis à flotação dessas partículas. Esta segunda possibilidade será abordada no presente trabalho, que objetiva contribuir para um melhor entendimento da importância da hidrodinâmica na flotação de partículas grossas.

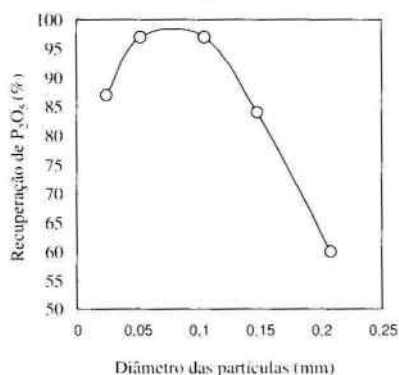


Figura 1: Recuperação de apatita versus tamanho das partículas. Resultado obtidos em ensaios de flotação (rougher) conduzidos com minério de fosfato em célula Denver de laboratório (Leal Filho et alii, 2004).

Tratamentos teóricos para o problema da baixa recuperação observada para partículas grossas enfrentam um prático e importante dilema: as forças que promovem a suspensão das partículas e seu encontro com as bolhas de ar, são as mesmas que podem desestabilizar o agregado partícula-bolha, promovendo a sua destruição. Diferentemente do processo de adesão partícula-bolha, que está relacionado à físico-química de superfície da partícula, a colisão partícula-bolha e a estabilidade do agregado constituem processos que são largamente afetados pelo ambiente físico dentro da célula de flotação, onde a hidrodinâmica tem importância fundamental (Leal Filho et al, 2003; Jewett, 1980; Rodrigues et al, 2001; Schulze, 1977; Ralston et al, 1999).

Em células mecânicas, para colidir com as bolhas de ar e flotar, as partículas devem estar em suspensão. Esta pode ser considerada como o resultado da turbulência (macroturbulência) criada pela rotação do impelidor ( $N$ ) e também pelo deslocamento ascendente das bolhas de ar dentro do tanque. Este fato indica que a flotação é realizada em ambientes altamente turbulentos (Número de Reynolds de impelidores em escala industrial na faixa de  $10^6$ - $10^7$ ) e um bom entendimento dos fenômenos requer a utilização da teoria estatística da turbulência, onde uma extensiva simplificação de complicadas leis caracteriza sua aplicação no processamento mineral (Schubert, 1999).

Para se garantir completa suspensão de partículas em líquidos, Zwietering (Zwietering, 1958) propôs o critério de que "nenhum sólido repousasse no fundo do tanque por mais de 1 ou 2 segundos"; tal critério tem sido usado na engenharia mineral através da denominação "1s criterium". A abordagem inicial proposta por Zwietering vem sendo modificada por outros pesquisadores de forma a incluir os efeitos causados pela presença de ar dentro da célula de flotação (Schulze, 1984). Assim, um valor crítico para a rotação do impelidor ( $N_{critico}$ ) no qual o "1s criterium" é válido pode ser experimentalmente determinado; este valor é também dependente, como mencionado, da aeração na qual a flotação é conduzida.

Diferente da suspensão da partícula, a qual, como apresentado, é largamente controlada pela macroturbulência, a dispersão do ar na polpa, as colisões turbulentas partícula-bolha e a destruição do agregado partícula-bolha são controladas pela microturbulência. A intensidade e a estrutura da microturbulência depende somente da taxa de dissipação de energia e da viscosidade cinemática da polpa. A energia média dissipada ( $\epsilon$ ) em tanques agitados e aerados contendo uma massa de polpa  $M$  e dissipando uma potência  $P$ , é expressa pela equação 1. Entretanto, na região próxima ao impelidor, a magnitude da dissipação de energia pode ser de 10 a 30 vezes superior ao valor médio (Schubert, 1999; Schulze, 1984).

$$\epsilon = P/M \quad (1)$$

Utilizando-se a teoria da microturbulência isotrópica de Komolgorov, flutuações locais da dissipação de energia que ocorrem no interior da célula de flotação podem ser desprezadas, simplificando o problema. Assim, o valor médio de outras variáveis que são relevantes para a hidrodinâmica de flotação de partículas grossas pode ser determinado; velocidade turbulenta, mínima aceleração dos vórtices, raio dos menores vórtices, tensões de cisalhamento, etc (Schubert, 1999; Schulze, 1984). Técnicas modernas baseadas em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e também em *Laser Doppler Velocimetry* têm ganhado a atenção dos cientistas e engenheiros engajados neste assunto. A tendência em hidrodinâmica de flotação caminha em direção a essas técnicas (Leal Filho et alii, 2002).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Cristais de apatita ígnea (massa específica =  $3080 \text{ kg/m}^3$ ) de Monteiro-PB foram cominuídos abaixo de 48 malhas Tyler (0,295mm) e posteriormente peneirados. O material na fração - 0,295mm + 0,208mm foi purificado através de separação em líquidos densos e posteriormente em separação magnética em um separador isodinâmico Frantz. A amostra purificada foi lavada com acetona, etanol e água antes dos experimentos de flotação. As esferas de vidro (massa específica =  $2480 \text{ kg/m}^3$ ) foram peneiradas e a massa da fração - 0,295mm + 0,208mm foi utilizada nos experimentos de flotação. Tanto para a apatita quanto para as esferas de vidro, o diâmetro médio das partículas foi calculado como sendo  $d_p=0,248\text{mm}$ . Este valor corresponde à média geométrica das aberturas das peneiras (0,295mm e 0,208mm) que foram utilizadas para a classificação dos sólidos.

Oleato de sódio (pureza analítica) foi usado como coletor para a apatita e um acetato de éter amina (Flotigan-EDA fornecido pela Clariant do Brasil) como coletor para as esferas de vidro. Hidróxido de sódio (grau analítico) foi usado para a regulação do pH.

O ângulo de contato ( $\theta$ ) das partículas de apatita e esferas de vidro, após condicionado com a solução de coletor, foi determinado através do método de Washburn (Subramanyan et al., 1999). A apatita foi condicionada com oleato de sódio (100 mg/l) e pH=10,5 por 1 minuto, assim como as esferas de vidro foram condicionadas com EDA (75 mg/l) em pH=10 por 1 minuto. A magnitude dos ângulos de contato medidos mostrou-se na faixa  $85^\circ < \theta < 88^\circ$  para as duas espécies de sólidos, mostrando a hidrofobicidade destas espécies. A viscosidade da polpa ( $\mu_p$ ) foi calculada utilizando-se a equação 2 (Roscoe, 1952), onde  $\mu_w$  é viscosidade dinâmica da água e  $\Phi$  é a fração volumétrica da polpa ocupada pelos sólidos.

$$\mu_p = \mu_w (1-\Phi)^{2,5} \quad (2)$$

Os experimentos de flotação foram conduzidos em célula de microflotação (diâmetro=32,2mm; altura=94,2mm) cujas dimensões e formato assemelham-se ao tradicional tubo de Hallimond modificado. Agitação foi promovida por um conjunto eixo-impelidor acoplado a um agitador com controle de velocidade de rotação e um torquímetro. O material flotado foi removido manualmente da célula através de uma pequena espátula. Gás (nitrogênio) foi borbulhado dentro da célula de microflotação através de uma placa de vidro sinterizada (raio médio dos poros=0,26mm). O diâmetro médio das bolhas ( $d_b$  = 0,37mm) foi estimado pelo método descrito por Manjiu (Manjiu et al., 1988) baseado no *hold-up* e na vazão de ar alimentada no sistema. De acordo com Yianatos (Yianatos et al., 1988), o valor estimado para  $d_b$  é  $\pm 15\%$  do valor real.

Impelidores (tipo cilíndrico, pá retangular e turbina de Rushton) com diâmetro (comprimento) de 15mm e largura de 6,52 mm foram usados nos experimentos de flotação. A rotação do impelidor (N) foi variada na faixa de  $0,07s^{-1}$  a  $49,33s^{-1}$ . Todos os experimentos de flotação foram conduzidos com 1 grama de sólidos, suspensos em solução contendo os coletores. A tensão superficial de ambas soluções de coletores ( $\gamma$ ) foram medidas através do método da placa de Wilhelmy. Para a solução de oleato de sódio (100 mg/l),  $\gamma=32$  mN/m a  $20^\circ C$  e para a solução de acetato de éter amina (75 mg/l),  $\gamma=36$  mN/m a  $20^\circ C$ . Após 1 minuto de condicionamento com coletor, gás ( $N_2$ ) foi introduzido no sistema a uma vazão de  $8,33 \times 10^{-7} m^3/s$  (*hold-up*  $\approx 3\%$ ) flotando-se por 60 segundos. Após cada ensaio de microflotação, os produtos flotado e afundado foram filtrados, secados e pesados. A recuperação foi calculada dividindo-se a massa do produto flotado pela massa de alimentação, expressando os resultados em porcentagem.

Para descrever as condições hidrodinâmicas dentro da célula de flotação, o diâmetro do impelidor (D), rotação do impelidor (N) e propriedades físicas da polpa foram combinadas para fornecer os números adimensionais: Reynolds (Re) e Froude (Fr). Informações sobre esses números estão apresentadas na tabela I.

Tabela I: Parâmetros hidrodinâmicos adimensionais referentes ao sistema macro (equipamento) de variáveis.

| Parâmetros   | Equações                             | Variáveis   |
|--|--------------------------------------|---|
| Número de Reynolds-Re<br>(Razão entre forças inerciais e viscosas)     | $Re = (ND^2 \rho) / \mu_p \quad (3)$ | $\rho$ = massa específica da polpa<br>$\mu_p$ = viscosidade dinâmica da polpa<br>$g$ = aceleração da gravidade<br>$N$ = velocidade de rotação do impelidor<br>$D$ = diâmetro do impelidor |
| Número de Froude-Fr<br>(Razão entre forças gravitacionais e inerciais) | $Fr = N^2 D / g \quad (4)$           |   |

O número de potência ( $Po$ ) é um parâmetro hidrodinâmico relacionado com as macrovariáveis: N, D,  $\rho$  e P (potência). A potência transmitida para o impelidor e, conseqüentemente, para a polpa, demonstrou ser menor que a sensibilidade do torquímetro disponível em laboratório. Assim,  $Po$  foi estabelecido através de equações empíricas (Nagata, 1975), que são válidas somente para impelidores do tipo pá retangular operando com  $Re > 10$ .

Para resolver o problema da geometria do impelidor utilizado nos experimentos de flotação (tipo cilíndrico), foi necessária a realização de correções no número de potência, baseadas na relação existente entre este e o coeficiente de arraste hidrodinâmico ( $C_D$ ) de corpos imersos. Esta correção leva em consideração, ainda, a similaridade geométrica entre os impelidores e a relação comprimento/largura (L/W) no caso de impelidores do tipo pá-retangular, ou diâmetro/largura (D/W) no caso de impelidores do tipo cilíndrico.

O cilindroide utilizado nos experimentos possui relação D/W de 2,3. Foi necessário, então, realizar uma interpolação numérica para os valores de  $C_D$  de cilindroides e de pás retangulares encontrados na literatura (Sissom et al., 1972; Knudsen et al., 1958) e calcular o fator de correlação  $f$  dado pela equação 5 para D/W=2,3. A magnitude de  $Po$  relacionado com o impelidor tipo cilindroide foi calculado pela equação 6.

$$f = [C_D \text{ (para cilindroide de } D/W=2,3)] / [C_D \text{ (para pá retangular de } L/W=2,3)] = 0,60 \quad (5)$$

$$Po = Po_{\text{cilindroide}} \approx f Po_{\text{pá retangular}} \quad (6)$$

Onde  $Po_{\text{cilindroide}}$  e  $Po_{\text{pá retangular}}$  são o número de potência referente ao impelidor tipo cilindroide e tipo pá retangular, respectivamente;  $f$  é o fator de correção e assume o valor  $f = 0,60$  para D/W=2,3. O número de potência foi utilizado para determinar a potência (P) fornecida para a polpa nos ensaios de microflotação, obtida através da equação 7, onde P é a potência fornecida para o impelidor,  $Po$  é o numero de potência, N é a velocidade de rotação do impelidor, D é o diâmetro do impelidor e  $\rho$  é a densidade da polpa.

$$P = Po N^3 D^5 \rho \quad (7)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de microflotação realizados em laboratório e resultados de investigações efetuadas em escala industrial, que buscam ressaltar a importância da hidrodinâmica na flotação de partículas grossas.

Os resultados observados nas figuras 2-4 indicam que é possível obter altas recuperações ( $R > 90\%$ ) para partículas grossas de apatita desde que as condições hidrodinâmicas sejam favoráveis:  $0,3 < Fr < 0,8$ ;  $Re < 4 \times 10^3$  e  $\epsilon < 0,2 \text{ W/kg}$ . Além disso, a recuperação de apatita grossa versus Fr, Re e  $\epsilon$  indicaram que em condições mais quiescentes ( $Fr < 0,3$ ;  $Re < 4 \times 10^3$  e  $\epsilon < 0,1 \text{ W/kg}$ ), existe uma deficiência na suspensão das partículas, ao contrário de condições mais turbulentas ( $Fr > 0,8$ ;  $Re > 4 \times 10^3$  e  $\epsilon > 1,0 \text{ W/kg}$ ), onde o agregado partícula-bolha é destruído (observação visual). Para se flotar partículas de apatita grossa eficientemente, deve-se encontrar um equilíbrio entre as forças que suspendem a partícula e promovem o encontro desta com a bolha e aquelas que promovem a desagregação partícula-bolha.

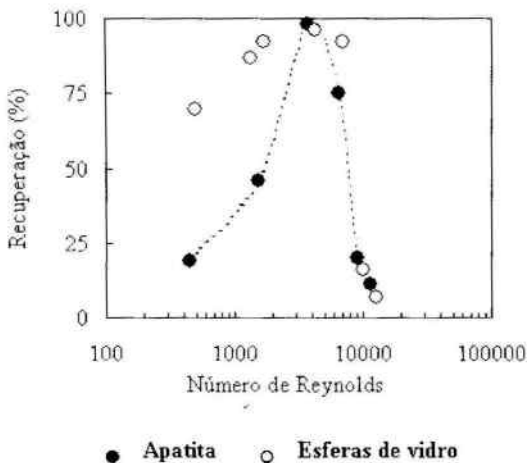


Figura 2: Recuperação de apatita e esferas de vidro ( $d_p=0,248\text{mm}$ ) versus número de Reynolds.

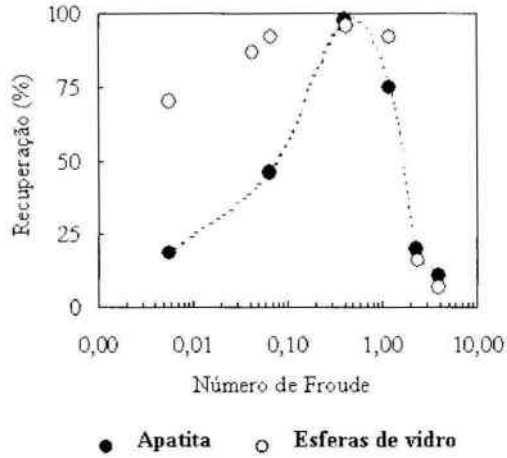


Figura 3: Recuperação de apatita e esferas de vidro ( $d_p=0,248\text{mm}$ ) versus número de Froude.

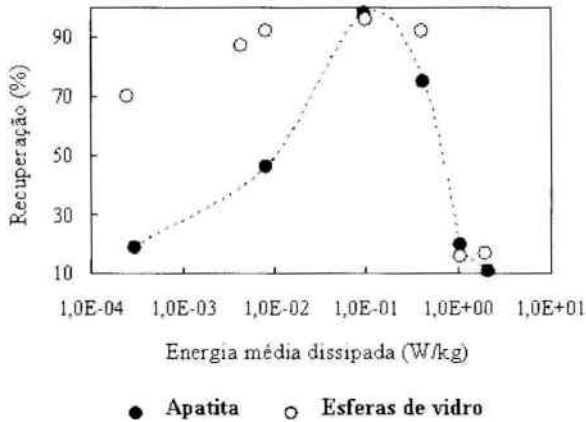


Figura 4: Recuperação de apatita e esferas de vidro ( $d_p=0,248\text{mm}$ ) versus energia média dissipada ( $\epsilon$ ).

Analisando-se as figuras 2-4, e comparando-se a recuperação da apatita e de esferas de vidro, é possível observar que para condições mais calmas ( $Fr < 0,1$ ,  $Re < 2000$  e  $\epsilon < 0,1$  W/kg), a recuperação das esferas de vidro é consideravelmente maior que a recuperação de apatita. Como a massa específica da apatita é consideravelmente maior que a das esferas de vidro ( $3080$  kg/m<sup>3</sup> versus  $2480$  kg/m<sup>3</sup>), as condições hidrodinâmicas adotadas foram suficientes para promover a suspensão eficiente das esferas de vidro, não ocorrendo o mesmo no caso das partículas de apatita. Desde que a suspensão das partículas poderia ser considerada como um resultado do fenômeno de transporte causado principalmente pela turbulência (macroturbulência) criada pela rotação do impelidor (N), as partículas de apatita demandam maior dissipação de energia para serem suspensas que as esferas de vidro. No entanto, sob condições hidrodinâmicas mais calmas caracterizadas por  $Fr < 0,01$ , a recuperação de esferas de vidro é influenciada pela geometria do impelidor, como ilustra a figura 5: o impelidor tipo cilíndrico produziu recuperações mais baixas que os impelidores do tipo pá retangular e turbina de Rushton. Utilizando-se o “*1s criterium*” de Zwietering, o impelidor do tipo pá retangular ( $N_{crítico} = 7,5$  s<sup>-1</sup>) e turbina de Rushton ( $N_{crítico} = 7,0$  s<sup>-1</sup>) foram mais eficientes que o impelidor do tipo cilíndrico ( $N_{crítico} = 9,5$  s<sup>-1</sup>) para promover a completa suspensão das partículas.

Sob as condições mais turbulentas adotadas neste sistema experimental, a recuperação de esferas de vidro e apatita foi muito baixa. No entanto, de acordo com a figura 5, sob as mesmas condições de turbulência, a recuperação de esferas de vidro foi também muito baixa, independentemente do tipo de impelidor utilizado nos experimentos. A interpretação para este fenômeno é dada por Shulze (Shulze, 1984): microturbulência, que é responsável pela desagregação partícula-bolha, é independente de sua fonte geradora.

Como a destruição do agregado partícula-bolha é passível de ocorrer em condições muito turbulentas, ela é responsável pela baixa recuperação esperada para partículas grossas se comparado com partículas mais finas. Estudos cinéticos atualmente conduzidos junto à Escola Politécnica da USP têm indicado este caminho (Leal Filho, 2003 – CNPq processo nº307103/2003-0; Grazieli, 2005 – FAPESP processo nº04/13685-2).

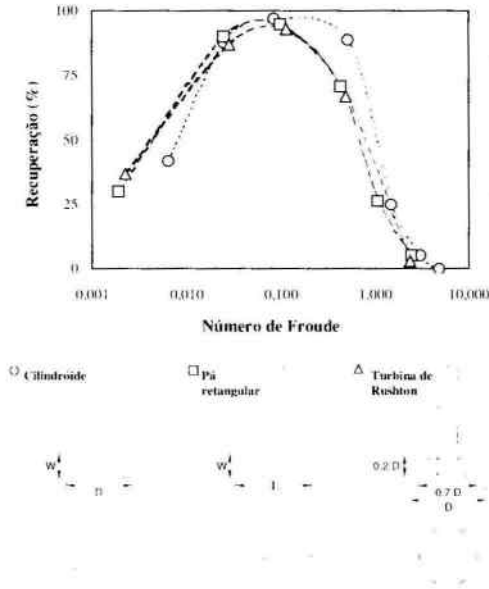


Figura 5: Influência da geometria do impelidor (D=15mm; W=6,52mm) na recuperação de esferas de vidro (d<sub>p</sub>=0,248mm) versus número de Froude.

Informações sobre as condições hidrodinâmicas que operam células rougher utilizadas em plantas industriais de flotação no Brasil são apresentadas na tabela II. Como todas as células pesquisadas foram fornecidas pela Wemco, seus impelidores possuem a mesma similaridade geométrica. O valor da energia média dissipada (1,3 W/kg) determinada na planta industrial de Catalão (Copebras) sugere que a desagregação partícula-bolha é esperada de ocorrer. Os números de Reynolds e de Froude estão na faixa das outras células industriais brasileiras, exceto na usina de Cajati (Bunge).

O número de Froude na planta industrial de Cajati (Fr=1,3) foi consideravelmente maior que o número de Froude de outras plantas industriais (Fr=0,6 e Fr=0,8), algumas modificações foram realizadas em um banco de células (banco-1), enquanto que um outro banco (banco-4) foi usado como referência. A velocidade de rotação do impelidor (N) no banco-1 foi sutilmente reduzida de forma a diminuir o número de Froude (Fr=1). Os resultados estão apresentados na tabela III, onde é possível observar que o conteúdo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de partículas grossas (+65 malhas Tyler) no rejeito do banco-1 é consideravelmente menor que na banco-4.

Tabela II: Características hidrodinâmicas de células mecânicas de algumas plantas industriais brasileiras concentradoras de fosfato.

| Empresa     | Localização da planta industrial | Tipo de célula | Re ( $\times 10^6$ ) | Fr  | $\epsilon$ ( <sup>15</sup> ) |
|-------------|----------------------------------|----------------|----------------------|-----|------------------------------|
| Fosfertil   | Tapira-MG                        | Wemco-120      | 0,9                  | 0,6 | ( <sup>15a</sup> )           |
| Ultrafertil | Catalão-GO                       | Wemco-144      | 1,3                  | 0,8 | ( <sup>15b</sup> )           |
| Copebras    | Catalão-GO                       | Wemco-120      | 1,0                  | 0,8 | 1,3 W/kg                     |
| Bunge       | Cajati-SP                        | Wemco-66       | 0,5                  | 1,3 | ( <sup>15c</sup> )           |

(<sup>15</sup>) Potência determinada por fluxo de corrente e medidas de voltagem.

(<sup>15a</sup>) n.d.= não determinado.

Tabela III: Desempenho da flotação de dois bancos de células mecânicas da planta industrial de Cajati (Bunge).

| Características das células e suas performances                      | Banco-1                            | Banco-4                            |
|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Diâmetro do impelidor (m)  | 0,29                               | 0,29                               |
| Rotação do impelidor ( $\text{min}^{-1}$ )                           | 350                                | 400                                |
| Número de Froude   | 1,0                                | 1,3                                |
| Conteúdo de $\text{P}_2\text{O}_5$ (+65 malhas Tyler) na alimentação | (8,5 $\pm$ 0,8)% ( <sup>17</sup> ) | (8,5 $\pm$ 0,8)% ( <sup>17</sup> ) |
| Conteúdo de $\text{P}_2\text{O}_5$ (+65 malhas Tyler) nos rejeitos   | (2,6 $\pm$ 0,6)% ( <sup>17</sup> ) | (4,8 $\pm$ 1,4)% ( <sup>17</sup> ) |

(<sup>17</sup>) Média de  $\text{P}_2\text{O}_5$  contido obtida durante 9 horas de operação contínua.

#### 4. CONCLUSÕES

Partículas grossas de apatita ( $d_p=0,25\text{mm}$ , ângulo de contato  $\sim 85^\circ\text{-}88^\circ$ ) apresentaram máxima recuperação ( $R>90\%$ ) em ensaios de microflotação quando  $0,3<Fr<0,8$ ;  $Re\sim 4\times 10^3$  e  $\epsilon\sim 0,1$  W/kg. Para condições hidrodinâmicas mais calmas ( $Fr<0,3$ ;  $Re<4\times 10^3$  e  $\epsilon<0,1$  W/kg), a recuperação de apatita decresceu devido a uma deficiência na suspensão das partículas, enquanto que para condições hidrodinâmicas mais severas ( $Fr>2$ ;  $Re>10^4$  e  $\epsilon>1,0$  W/kg) a recuperação também decresceu devido à destruição do agregado partícula-bolha. Partículas grossas de esferas de vidro ( $d_p=0,25\text{mm}$ , ângulo de contato  $\sim 85^\circ\text{-}88^\circ$ ) apresentaram recuperação semelhante à da apatita, exceto sobre condições hidrodinâmicas mais quiescentes. Neste caso, esferas de vidro (massa específica= $2480\text{ kg/m}^3$ ) flotaram melhor que a apatita (massa específica= $3080\text{ kg/m}^3$ ) porque o impelidor, nestas condições, foi capaz de promover boa suspensão de parte das partículas. Estes resultados mostram que altas recuperações de apatita (e esferas de vidro) são possíveis de serem obtidas em células mecânicas, desde que as condições hidrodinâmicas sejam favoráveis.

Para ilustrar o comportamento hidrodinâmico na flotação de partículas grossas de apatita, modificações em escala industrial foram testadas: a velocidade de rotação do impelidor (N) foi diminuída de forma a diminuir o número de Froude de  $Fr=1,3$  para  $Fr=1,0$ . O conteúdo de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na fração + 65 malhas Tyler dos rejeitos decresceram de 4,8% para 2,6%.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, processo n° 04/13685-2) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo n° 307103/2003-0) que fornecem subsídios para esta pesquisa. Os autores gostariam de estender os agradecimentos às minerações de fosfato Fosfertil, Bunge e Copebras por proverem informações muito úteis para a elaboração do presente artigo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Foggler, H. S., 1999. *Elements of chemical reaction engineering*, 3rd edition. Prentice-Hall, 967pp.
- Grazieli, H.A., 2005. Flotação de Apatita em Células Mecânicas: Aumento da recuperação de partículas grossas através do controle de variáveis hidrodinâmicas. Projeto de pesquisa FAPESP processo nº04/13685-2.
- Jewett, A., 1980. Formation and disruption of particle-bubble aggregates in flotation. In: P. Somasundaran (Editor), *Fine Particles Processing*, Vol. 1, AIME, New York, pp. 720-754.
- Knudsen, J. G.; Kats, D. I., 1958. Fluid dynamics and heat transfer. McGraw Hill, New York, pp. 246-322.
- Leal Filho, L. S.; Rodrigues, W. J.; Ralston, J., 2003. Importance of hydrodynamics in coarse particle flotation. Proceedings of the international conference Flotation and Flocculation – from Fundamentals to Applications. University of South Australia, Mawson Lakes, pp. 203-212.
- Leal Filho, L.S., 2003. Flotação de Apatita em Células Mecânicas: Aumento da recuperação de partículas grossas através do controle de variáveis hidrodinâmicas. Projeto de pesquisa CNPq processo nº307103/2003-0.
- Leal Filho, L.S.; Rodrigues, W.J.; Lima, O.A.; Barros, L.A.F., The role of hydrodynamics in coarse apatite flotation. Proceedings of the Conference Beneficiation of Phosphate IV – Miami, 2004.
- Manqiu, X.; Finch, J. A., 1988. Bubble diameter estimation in a mechanically agitated flotation cell. *Minerals and Metallurgical Processing*, 5, pp. 43-44.
- Nagata, S., 1975. *Mixing: principles and applications*, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-65.
- Ralston, J., Fornasiero, D. and Hayes, R., 1999. Bubble-particle attachment and detachment in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 56, pp.133-164.
- Rodrigues, W. J.; Leal Filho, L. S.; Masini, E. A., 2001. Dimensionless hydrodynamic parameters and their influence on flotation behavior of coarse glass spheres. *Minerals Engineering*, Vol. 14, pp. 1047-1054.
- Roscoe, R., 1952. The viscosity of suspensions of rigid spheres. *British Journal of Applied Physics*, 3, pp. 267-269.
- Schubert, H., 1999. On the turbulence – controlled microprocesses in flotation machines. *International Journal of Mineral Processing*, 56 pp. 257-276.
- Schulze, H. J., 1977. New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of floatability. *International Journal of Mineral Processing*, 4, pp. 241-259.
- Schulze, H. J., 1984. *Physico-chemical elementary processes in flotation*. Elsevier, Amsterdam, pp. 21-52.
- Sissom, L. E.; Pitts, D. R., 1972. Elements of transport phenomena, McGraw Hill, New York, 765 pp.
- Subramanyan, T. V.; Monte, M. B. M.; Middea, A.; Valdiviezo, E.; Lins, F. A. F., 1999. Minerals Engineering, 12, pp. 1347-1357.
- Uhl, V. W.; Gray, J. B., 1966. *Mixing: theory and practice*, vol.1, Academic Press Inc., New York, pp. 123-124.
- Yianatos, J. B.; Finch, J. A.; Dobby, G. S.; Manqiu, X., 1998. Bubble size estimation in a bubble swarm. *J. Coll. Interface Science*, 126, pp. 37-44.
- Zwietering, N. T., 1958. Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chemical Engineering Science*, 8, pp. 244-253.