

EFEITO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS SOBRE A RELAÇÃO TEOR-RECUPERAÇÃO NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO

L.C.M. Montenegro, O.N. Savassi e A.E.C. Peres

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG
Rua Espírito Santo 35/206, Belo Horizonte, MG, aecperes@demet.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo para flotação de minérios de ferro que permite prever o efeito das condições operacionais sobre a recuperação de ferro e o teor de sílica no afundado (concentrado de ferro). O modelo é facilmente calibrado baseando-se em amostragem direta e pode ser utilizado para a otimização e o controle de circuitos industriais de flotação. Dados obtidos em uma coluna de flotação de laboratório são utilizados para ilustrar a aplicação do modelo a um caso específico. O efeito de variações na dosagem de coletor, vazão de ar e altura da região de espuma é investigado.

INTRODUÇÃO

A flotação reversa de quartzo é frequentemente utilizada em plantas de tratamento de minérios de ferro para a adequação do teor de concentrados de granulometria mais fina (PFF). Em resposta à variação natural das características do minério na alimentação, as condições operacionais do circuito de flotação são constantemente ajustadas com o objetivo de se maximizar a produção de concentrado de ferro dentro da especificação do teor de sílica permitido.

Quantificar o efeito das condições operacionais sobre a relação entre o teor de sílica e a recuperação de ferro é essencial para a otimização e o controle de um circuito industrial de flotação. Naturalmente, a metodologia mais segura para se obter tal informação é baseada em amostragem direta do circuito. Entretanto, de modo a se reduzir custos experimentais e a se sistematizar a massa de informação obtida, as técnicas de modelamento e simulação podem ser utilizadas para prever o efeito de condições operacionais não analisadas pela amostragem direta. Uma vez que a relação teor-recuperação seja conhecida dentro de uma ampla faixa de variação, pode-se então determinar as melhores condições operacionais de acordo com as características do

minério na alimentação de cada célula ou coluna no circuito de flotação.

O objetivo deste artigo é portanto propor um modelo para flotação que descreva o efeito das condições operacionais sobre a relação teor-recuperação em uma célula ou coluna de flotação. O modelo é facilmente calibrado a partir de dados obtidos por amostragem direta e inclui explicitamente variáveis tais como a dosagem de coletor, a altura da camada de espuma e a vazão de ar e da polpa na alimentação da célula ou coluna investigada.

ESTRUTURA DO MODELO

O modelo aqui proposto leva em consideração a contribuição individual das regiões de polpa e espuma na recuperação de cada espécie mineral presente no sistema de flotação investigado. Os únicos dados experimentais necessários para a calibração do modelo são os teores e as recuperações das várias espécies minerais bem como a altura da camada de espuma e a vazão volumétrica de ar e da polpa na alimentação. O modelo pode ser utilizado tanto para colunas quanto para células convencionais, dependendo da equação utilizada para descrever a distribuição do tempo de residência na região de polpa.

Assumindo-se fluxo pistão ("plug-flow") para o caso de colunas, a relação entre a recuperação na região de polpa, R^{polpa} , a constante de flotação, k , e o tempo médio de residência, τ , é expressa por (Lynch et al., 1981):

$$R^{polpa} = 1 - \exp(-k \cdot \tau) \quad (1)$$

Assumindo-se mistura perfeita na região de polpa de células convencionais, a recuperação naquela região é expressa por (Lynch et al., 1981):

$$R^{polpa} = \frac{k \cdot \tau}{1 + k \cdot \tau} \quad (2)$$

O fluxo superficial de área de bolha, S_b , representa a disponibilidade de ar para a coleta de partículas hidrofóbicas em termos da área total das bolhas atravessando a área transversal da região de polpa por

unidade de tempo. Dada a vazão volumétrica de ar por área transversal, J_g , e o diâmetro médio das bolhas na região de polpa, d_b , o fluxo superficial de área de bolha pode ser estimado por (Finch and Dobby, 1990):

$$S_b = 6 \cdot \frac{J_g}{d_b} \quad (3)$$

Caso não seja possível medir o diâmetro médio das bolhas na região de polpa, a seguinte equação empírica pode ser utilizada (Finch and Dobby, 1990):

$$d_b = 0.1 \cdot J_g^{0.25} \quad (4)$$

A constante de flotação pode ser expressa em termos da eficiência de coleta na região de polpa, E_k , e do fluxo superficial de área de bolha de acordo com a seguinte equação (Dobby and Finch, 1987):

$$k = \frac{E_k}{4} \cdot S_b \quad (5)$$

Nem todas as partículas aderidas a bolhas região de polpa são transportadas para o concentrado de uma célula ou coluna de flotação devido ao desprendimento na região de espuma. Em geral, a recuperação na região de espuma diminui com um aumento do tempo médio de residência do ar naquela região, λ_{ar} , o qual, dada a altura da camada de espuma, h , pode ser estimado por (Szatkowski, 1987):

$$\lambda_{ar} = \frac{h}{J_g} \quad (6)$$

A seguinte equação é aqui proposta para descrever a relação entre a recuperação na região de espuma e o tempo médio de residência do ar naquela região:

$$R^{espuma} = \exp(-\phi \cdot \lambda_{ar}) \quad (7)$$

A equação (7) foi desenvolvida assumindo-se que a coalescência e o colapso de bolhas constituem as principais causas para o desprendimento de partículas na região de espuma (Feteris et al., 1987, Falutsu, 1994, Savassi, 1999) e que a taxa de desaparecimento da superfície total de bolha segue uma equação diferencial de primeira ordem. De acordo com estas aproximações, ϕ representa uma constante de desprendimento a qual depende apenas do grau de coalescência e colapso de bolhas na região de espuma. Neste sentido, ϕ apresenta o mesmo

valor para todos os minerais no sistema (enquanto que E_k varia de mineral para mineral).

Dadas as recuperações nas regiões de polpa e espuma, a recuperação total de cada espécie mineral no flotado (fração rica em sílica) pode ser calculada pela seguinte equação (Shaning Yu, 1985):

$$R^{total} = \frac{R^{polpa} \cdot R^{espuma}}{R^{polpa} \cdot R^{espuma} + 1 - R^{polpa}} \quad (8)$$

Uma vez que o teor de cada espécie mineral na alimentação e sua recuperação no flotado sejam conhecidos, pode-se então calcular o teor e a recuperação no afundado por balanço de massa.

Deve ser enfatizado que os únicos parâmetros a ser calibrados no modelo são a eficiência de coleta na região de polpa, E_k , e a constante de desprendimento na região de espuma, ϕ . Tais parâmetros não variam com mudanças na vazão do ar ou na altura da camada de espuma, uma vez que dependem apenas da dosagem de coletor e do teor da alimentação da célula ou coluna investigada. De modo a se incluir no modelo o efeito destas variáveis, é ainda necessário utilizar equações auxiliares que descrevam o efeito da dosagem de coletor sobre E_k e ϕ para determinados valores do teor da alimentação. A forma de tais equações depende do sistema investigado (veja Resultados e Discussão).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De modo a ilustrar a aplicação do modelo a um caso específico, uma campanha de amostragem foi conduzida em uma coluna de laboratório de 4 cm de diâmetro e 160 cm de altura. A coluna era equipada com um medidor para a vazão de ar e por dois eletrodos paralelos de aço inoxidável, dispostos verticalmente ao longo da coluna, os quais eram utilizados para o controle do nível da polpa e da altura da camada de espuma.

O minério utilizado constituía alimentação de uma coluna "cleaner" industrial com teor fixo de sílica de 0.8 % aproximadamente. Note que, no caso de aplicação mais geral, a campanha de amostragem deveria incluir testes em que o teor da alimentação da célula ou coluna investigada apresentasse uma ampla faixa de variação.

Foram realizadas 3 séries de 5 testes, cada série com dosagens de coletor (amina a 40, 80 e 160 g/t) e depressor fixas (amido a 250 g/t). A vazão de ar foi variada na faixa de J_g entre 0.1 e 0.3 cm/s, enquanto a altura da camada de espuma foi variada entre 3 e 12 cm. Foram coletadas amostras para análise química do teor de sílica e ferro (hematita) na alimentação, no flotado e no afundado

produzidos em cada teste. O teor combinado de todos os outros minerais no sistema foi calculado por diferença.

O modelo foi então calibrado pelo ajuste simultâneo dos parâmetros E_k e ϕ , baseando-se nas recuperações e teores observados nas condições operacionais de cada teste. No total foram utilizados 45 pares de dados experimentais.

RESULTADOS e DISCUSSÃO

A comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo é apresentada na Figura 1 para o teor de sílica e na Figura 2 para a recuperação de ferro no afundado. O coeficiente de correlação (r^2) entre os valores observados e estimados neste caso é superior a 0.90. Assim o modelo consegue agregar a facilidade de calibração com robustez, permitindo investigar com confiança o efeito das condições operacionais sobre a relação teor-recuperação na flotação de minérios de ferro.

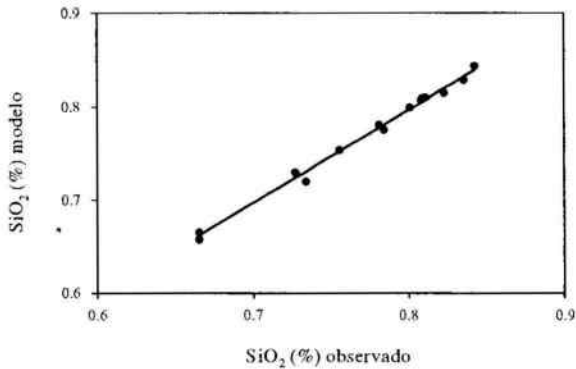


Figura 1 - Comparação entre os teores de sílica observados no afundado e os valores estimados pelo modelo.

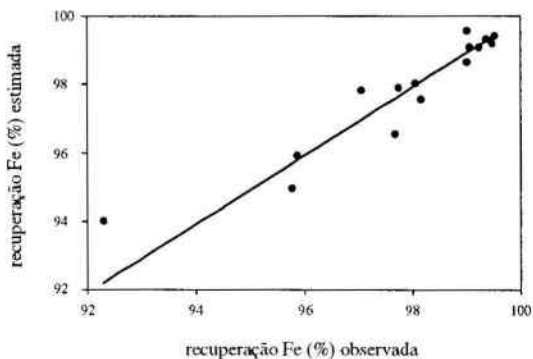


Figura 2 - Comparação entre a recuperação de ferro no afundado e os valores estimados pelo modelo.

O efeito da dosagem de coletor sobre a eficiência de coleta e a constante de desprendimento é ilustrado na Figura 3. Note que, dentro da faixa investigada, E_k aumenta com a adição de coletor e que o valor observado para sílica é de duas a três vezes maior do que aquele observado para hematita. Por outro lado, ϕ diminui com a adição de coletor, indicando um fortalecimento da estrutura da espuma devido ao aumento da concentração de partículas hidrofóbicas naquela região (Dippennar, 1981).

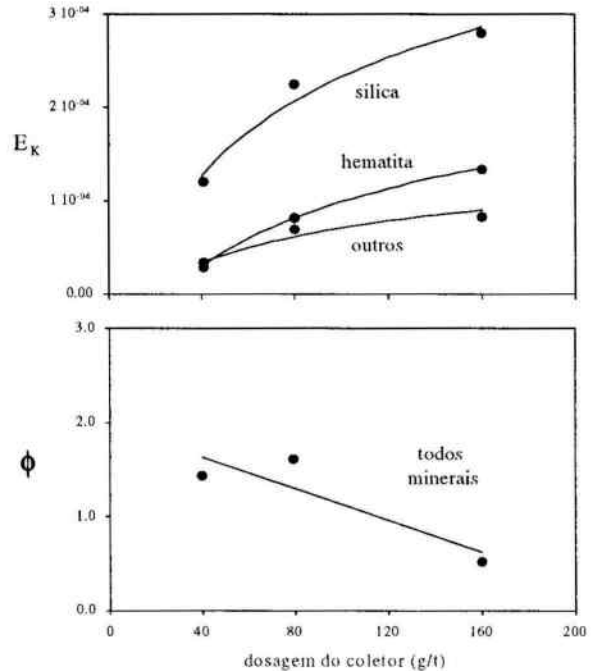


Figura 3 - Efeito da dosagem de coletor sobre a eficiência de coleta e a constante de desprendimento.

Os resultados na Figura 3 sugerem as seguintes equações auxiliares, as quais podem ser utilizadas para estimar a variação da eficiência de coleta e da constante de desprendimento dentro da faixa de dosagem de coletor no sistema de flotação investigado:

$$E_k = A \cdot \ln(\text{dosagem de coletor}) - B \quad (9)$$

$$\phi = C \cdot (\text{dosagem do coletor}) + D \quad (10)$$

Após a calibração, o modelo pode ser utilizado para prever o efeito das condições operacionais sobre o teor de sílica e a recuperação de ferro em condições não analisadas por amostragem direta. As Figuras 4 e 5 apresentam resultados de simulação para variação na dosagem de coletor mantendo-se fixas a vazão de ar ou a altura da espuma. Como poderia ser esperado, os resultados de simulação indicam que uma redução no teor de sílica no afundado pode ser obtida por aumento na

concentração de coletor ou um aumento na vazão de ar ou ainda por uma redução na altura da camada de espuma.

A principal vantagem da utilização do modelo aqui apresentado é a possibilidade de se otimizar as condições operacionais de modo a se obter máxima recuperação de ferro para um teor fixo de sílica no afundado. Por exemplo, no sistema investigado, as melhores condições para se obter um afundado com teor de sílica de 0.77 % são: 47 gramas de amina por tonelada de minério, J_g igual a 0.3 cm/s e altura da camada de espuma igual a 2 cm. Nestas condições o modelo prevê que a recuperação de ferro no afundado seria de 98.5 %.

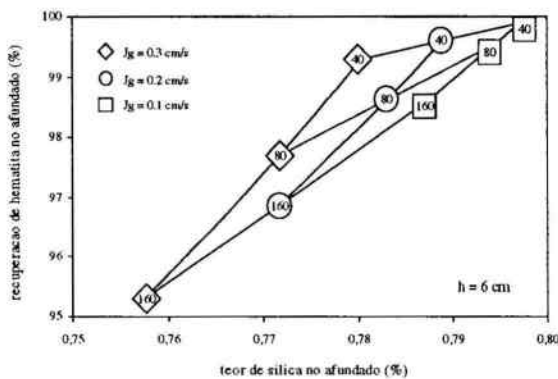


Figura 4 - Efeito da dosagem de coletor e vazão de ar sobre a relação teor-recuperação

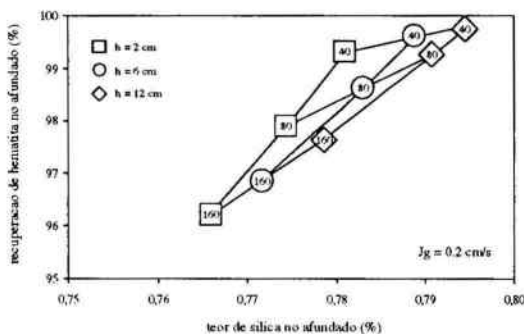


Figura 5 - Efeito da dosagem de coletor e altura da espuma sobre a relação teor-recuperação

CONCLUSÕES

O controle do processo de flotação depende de um grande número de variáveis. Estas variáveis podem ter efeito significativo sobre o teor e/ou a recuperação do mineral de interesse. A existência de interações entre estas variáveis, além de perturbações

que não podem ser medidas ou controladas, tornam o processo de flotação um dos mais complexos. A utilização de dados experimentais para promover uma melhoria na eficiência do processo de flotação pode tornar-se muito dispendiosa; assim há necessidade do emprego de uma análise mais sofisticada.

A modelagem matemática apresenta-se como a melhor forma para prever o comportamento do processo de flotação dentro de uma faixa ampla de condições e com baixo custo e mínimo tempo experimental.

O modelo aqui apresentado é baseado em equações cujas premissas são claramente estabelecidas, apesar de seus parâmetros serem obtidos de forma empírica. Assim o modelo consegue agregar a facilidade de calibração com robustez, permitindo investigar com confiança o efeito das condições operacionais sobre a relação teor-recuperação na flotação de minérios de ferro.

REFERÊNCIAS

- Dippenaar A. The Destabilization of Froth by Solids I: The Mechanism of Film Rupture. *International Journal of Mineral Processing*, vol 9, pp 1-14, 1982.
- Dobby, G.S. and Finch, J.A. Particle Size Dependence in Flotation derived from a Fundamental Model of the Capture Process. *International Journal of Mineral Processing*, vol 21, pp 241-260, 1987.
- Falutsu M., 1994. Column Flotation Froth Characteristics - Stability of the Bubble Particle System. *International Journal of Mineral Processing*, vol 40, pp 225-243.
- Feteris S.M., Frew J.A. and Jowett A., 1987. Modelling the Effect of Froth Depth in Flotation. *International Journal of Mineral Processing*, vol 20, pp 121-135.
- Finch, J.A. and Dobby, G.. *Column Flotation*. Pergamon Press, England, 180 pp., 1990.
- Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V. and Thorne C.G. *Mineral and Coal Flotation Circuits: Their Simulation and Control*. Elsevier Scientific, Amsterdam, 1981.
- Savassi, O.N. Direct Estimation of the Degree of Entrainment and the Froth Recovery of Attached Particles in Industrial Flotation Cells. Ph.D. Thesis, University of Queensland, 1999.
- Shaning Yu. Particle Collection in a Flotation Column. M.Sc. Thesis, McGill University, 1985.

Szatkowski, M. Factors Influencing the Behaviour of Flotation Froths. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C), vol 96, pp 115-122, 1987.