



ESTUDO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS NA EFICIÊNCIA DA FLOTAÇÃO INDUSTRIAL DE APATITA ULTRAFINA DE TAPIRA, UTILIZANDO A TÉCNICA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTAS E ANÁLISE CANÔNICA

SILVA, F.B.R.¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Minas e Construção Civil. E-mail: fernandobrasilva@cefetmg.br

RESUMO

Na mineração de rocha fosfática de Tapira-MG, é produzido o concentrado fosfático ultrafino (85% passante em 44 μm), com teor de 35,0% de P_2O_5 , a partir das lamas geradas no processo de beneficiamento, e destinado à produção de fertilizantes. Atualmente, somente 1,2% da massa que alimenta a usina de beneficiamento se torna concentrado ultrafino, 13,5% concentrado convencional e os 85,3% restantes, representados pelo rejeito de flotação e lamas naturais. Considerando que, na flotação industrial de apatita ultrafina existem diversas variáveis de atuação direta do operador, que influenciam diretamente na eficiência da etapa, foi feito um estudo do efeito destas variáveis na recuperação mássica da flotação industrial de apatita ultrafina. Para tal, foi utilizado o banco de dados histórico, onde todas as variáveis foram adimensionalizadas conforme a faixa experimental utilizada. A relação entre a recuperação mássica e as variáveis foi explicada pelas superfícies de respostas e, as variáveis maximizadas foram obtidas através da análise canônica. Mediante os resultados obtidos, pode-se verificar que, para teores acima de 35% de P_2O_5 no concentrado, a recuperação depende fortemente da frente de lavra de minério e atinge até 24% quando se elevam as dosagens de depressor e coletor.

PALAVRAS-CHAVE: Apatita, Ultrafina, Flotação, Superfície de resposta, Análise canônica.

ABSTRACT

In the phosphate rock mining of Tapira-MG, ultrafine phosphate concentrate (85% less than 44 μm), with 35.0% of P_2O_5 , is produced from slurry generated in the beneficiation process and destined to the fertilizers production. Currently, only 1.2% of the mass that feeds the processing plant becomes ultrafine concentrate, 13.5% conventional concentrate and the remaining 85.3%, represented by flotation tailings and natural slurry. Considering that in the ultrafine apatite industrial flotation there are several variables of direct operator action, which directly influence the efficiency, a study of the effect of these variables on the mass recovery of the ultrafine apatite industrial flotation was made. For this, was used the historical database, where all variables were dimensioned according to the experimental range used. The relationship between mass recovery and variables was explained by the response surfaces and the maximized variables were obtained through canonical analysis. From the results obtained, it can be verified that, for grades above 35% of P_2O_5 in the concentrate, the recovery depends strongly on the ore mining front and reaches up to 24% when the depressor and collector dosages are increased.

KEYWORDS: Apatite, Ultrafine, Flotation, Response surface, Canonical analysis.

1. INTRODUÇÃO

No município de Tapira-MG, localizado na região oeste do Estado de Minas Gerais, no vale do Paranaíba, há mineração de rocha fosfática, cujas atividades consistem na lavra a céu aberto, beneficiamento de minério fosfático e transporte de concentrado fosfático via mineroduto. Os produtos são o concentrado fosfático convencional com teor de 35,0% de P_2O_5 (15% passante em 44 μm) obtido a partir do minério com teor de P_2O_5 da ordem de 8,0% e o concentrado fosfático ultrafino com teor de 35,0% de P_2O_5 (85% passante em 44 μm), obtido a partir de lamas do processo.

Segundo BARROS (2006), antigamente recuperava-se apenas a rocha fosfática grossa com elevado teor de fósforo e desprezavam-se os finos. Ao passar dos anos e com a evolução dos processos, desenvolveram-se técnicas capazes de elevar o teor de fósforo nos finos. Uma das técnicas mais importantes, das mais utilizadas na indústria mineral e que mais aumentam esse teor é o processo de flotação, que pode elevar um teor de 8% de P_2O_5 , ou menos, para até 40%. Em meados de 2001, foram desenvolvidas técnicas de flotação para a apatita ultrafina, que propiciaram o aumento da recuperação mássica da empresa de mineração em, aproximadamente, 1,1%. A Figura 1 mostra o circuito da flotação de apatita ultrafina, que é composto por duas colunas de flotação (estágios *Rougher* e *Cleaner*) e uma célula mecânica de flotação (estágio *Scavenger*).



Figura 1. Circuito de flotação de apatita ultrafina.

Porém ressalta-se, que as perdas no rejeito das etapas de flotação de fosfato ainda são bastante elevadas, em uma média de 47,3% da massa total que alimenta a usina de beneficiamento. De acordo com BARROS (1997) apud GUIMARÃES et al. (2004), perde-se 15 % na lavra, e de 2 a 5 % no transporte e manuseio do concentrado fosfático. A maior perda na etapa de beneficiamento mostra a necessidade de mais aprimoramentos no processo de flotação buscando o aumento de recuperação e, conseqüentemente, a redução da geração de rejeitos que são destinados às barragens.

Considerando que a flotação industrial de apatita ultrafina possui diversas variáveis de atuação no processo, como vazão de ar das colunas de flotação e dosagem de reagentes químicos (depressor, soda e coletor), além de uma influência forte da qualidade da apatita que alimenta o circuito industrial, foi proposto neste trabalho um estudo estatístico do efeito destas variáveis na eficiência da flotação de apatita ultrafina, de forma a determinar os valores das variáveis que maximizam a recuperação mássica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Definição das variáveis em estudo

Neste trabalho, foi utilizado o banco de dados histórico da empresa de rocha fosfática, do ano de 2012 a 2014, com aproximadamente 680 dados. Inicialmente, foi feito um filtro para apenas dados cujos teores de P_2O_5 se encontram acima de 35% no concentrado, valor acima do qual o mesmo é considerado dentro de especificação. As variáveis foram classificadas em variável dependente (ou de saída) e variáveis independentes (ou de entrada).

A variável dependente neste estudo foi a recuperação mássica da flotação industrial de apatita ultrafina, que representa a eficiência da etapa. A mesma foi calculada com a Equação 1 a seguir:

$$R_{MASSUF} = \frac{(a - r)}{(c - r)} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Onde:

R_{MASSUF} = recuperação mássica do circuito de flotação, em %

a = teor de P_2O_5 na alimentação nova do circuito de flotação (etapa *Rougher*), em %

c = teor de P_2O_5 no concentrado final do circuito de flotação (etapa *Cleaner*), em %

r = teor de P_2O_5 no rejeito final do circuito de flotação (etapa *Scavenger*), em %

Já as variáveis independentes, incluem dois tipos: variáveis do minério que alimenta a usina de beneficiamento e variáveis de processo da flotação industrial. A Tabela 1 apresenta as variáveis independentes consideradas neste estudo, bem como a faixa experimental utilizada.

Tabela 1. Variáveis independentes consideradas no estudo da flotação industrial de apatita ultrafina.

Tipo	Variável	Faixa experimental	Descrição
Minério	Percentual da frente 02	0 a 100%	% de minério lavrado na frente de lavra 02
Minério	Teor de P_2O_5	7,3 a 8,9%	Teor do minério que alimenta a flotação
Processo	Dosagem de depressor	400 a 600 g/t	Dosagem do reagente depressor na flotação
Processo	Dosagem de coletor	220 a 420 g/t	Dosagem do reagente coletor na flotação
Processo	Dosagem de soda	7,9 a 12,3 L/h	Dosagem do reagente soda na flotação
Processo	Vazão de ar <i>Rougher</i>	322 a 680 m ³ /h	Vazão de ar na coluna de flotação <i>Rougher</i>
Processo	Vazão de ar <i>Cleaner</i>	161 a 611 m ³ /h	Vazão de ar na coluna de flotação <i>Cleaner</i>

2.2. Preparação do banco de dados

A variável dependente, ou seja, a recuperação mássica da flotação, foi utilizada no valor encontrado na Equação 1.

Já as variáveis independentes, apresentadas na Tabela 1, foram adimensionalizadas utilizando a Equação 2, apresentada a seguir:

$$x = \frac{X - \bar{x}}{FM - \bar{x}} \quad (2)$$

Onde:

x = valor da variável independente adimensionalizada

X = valor da variável independente em sua grandeza de origem

\bar{x} = valor médio da variável independente

FM = fator multiplicador, calculado pela Equação 3

$$FM = \frac{\text{MAIOR VALOR} - \bar{x}}{2} + \bar{x} \quad (3)$$

2.3. Regressão múltipla e elaboração das superfícies de respostas

Após a adimensionalização das variáveis independentes, foi realizada a regressão múltipla no software Statística®. Para que houvesse boa relação entre as variáveis em estudo, foi feita a análise residual, buscando coeficientes de correlação quadráticos de, no mínimo, 0,80.

Em sequência, os efeitos das variáveis independentes sobre a variável dependente foram avaliados e, para explicar melhor a relação entre elas, foram elaboradas superfícies de resposta utilizando o software Statística®. A partir das mesmas, foi possível explicar fisicamente o comportamento da recuperação mássica mediante a mudança dos valores das variáveis independentes.

2.4. Análise canônica

Foram obtidas equações empíricas que representam a variável dependente em função das variáveis independentes, permitindo a identificação dos efeitos das variáveis. Esta relação é apresentada pela Equação 4 na qual há um modelo de segunda ordem, escrito na forma matricial, mostrando o relacionamento da variável dependente (\hat{y}) com as variáveis independentes (x), em que b é o vetor dos coeficientes de primeira ordem, B é a matriz simétrica dos coeficientes de segunda ordem e de interações e x' é a matriz transposta das variáveis independentes.

$$\hat{y} = b_0 + x' b + x' B x \quad (4)$$

Onde:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad x' = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_k]$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & \frac{b_{12}}{2} & \dots & \frac{b_{1k}}{2} \\ \frac{b_{21}}{2} & b_{22} & \dots & \frac{b_{2k}}{2} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \frac{b_{k1}}{2} & \frac{b_{k2}}{2} & \dots & b_{kk} \end{bmatrix}$$

Em seqüência, o ponto estacionário (x_0) foi calculado pela Equação 5.

$$x_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} b \quad (5)$$

Para determinar a natureza do ponto estacionário (x_0), ou seja, se é ponto de máximo, de mínimo ou de sela, as raízes características (λ_1 a λ_k), foram calculadas utilizando a Equação 6, na qual B é a matriz simétrica dos coeficientes de segunda ordem e de interações e I é a matriz identidade.

$$\det(B - \lambda . I) = 0 \quad (6)$$

Como algumas raízes características apresentaram valores positivos e negativos, o ponto estacionário foi classificado como ponto de sela. Dessa forma, foi realizada a análise canônica, utilizando o software Maple®. A Equação 4 foi transformada na forma canônica, sendo representada pela Equação 7, onde \hat{y} é a variável dependente na forma canônica, \hat{y}_0 é a variável dependente estimada no ponto estacionário e w_1 a w_k são as variáveis independentes transformadas para a forma canônica. Portanto, a superfície de resposta foi então, expressa por novas variáveis w_1, w_2, \dots, w_k , cujos eixos correspondem aos eixos principais do novo sistema de contornos.

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_k w_k^2 \quad (7)$$

Para calcular a resposta estimada no ponto estacionário (\hat{y}_0), foi utilizada a Equação 8, onde b é o vetor dos coeficientes de primeira ordem, B é a matriz simétrica dos coeficientes de segunda ordem e de interações e x'_0 é a matriz transposta do ponto estacionário (x_0), que é o ponto onde a derivada se anula.

$$\hat{y}_0 = b_0 + x'_0 b + x'_0 B x_0 \quad (8)$$

Por fim, após encontrar os valores das variáveis independentes que maximizam a recuperação mássica, as mesmas foram convertidas da forma adimensionalizada para os valores de origem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a metodologia empregada neste estudo, as variáveis canônicas (w) e independentes na forma codificada (x) que maximizaram a recuperação mássica da flotação industrial de apatita ultrafina foram as seguintes:

$$w = \begin{bmatrix} -4 \\ -4,5 \\ -2,2 \\ 0,0 \\ -4,0 \\ -5,0 \\ 18,0 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} 1,967 \\ 0,229 \\ -1,544 \\ -0,882 \\ -0,411 \\ 0,714 \\ -0,965 \end{bmatrix}$$

Neste ponto, a recuperação mássica da flotação industrial de apatita ultrafina obtida foi de 23,95 %, sendo considerado um valor de excelência, uma vez recuperações acima de 19,2% atendem ao planejamento da produção de rocha fosfática ultrafina.

A Tabela 2 mostra os valores de origem das variáveis independentes que maximizam a recuperação mássica.

Tabela 2. Valores das variáveis independentes que maximizam a recuperação mássica da flotação industrial de apatita ultrafina.

Variável	Faixa experimental
Percentual da frente 02	99,2%
Teor de P ₂ O ₅	8,2%
Dosagem de depressor	423 g/t
Dosagem de coletor	276 g/t
Dosagem de soda	9,6 L/h
Vazão de ar <i>Rougher</i>	278 m ³ /h
Vazão de ar <i>Cleaner</i>	165 m ³ /h

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, nota-se que a recuperação mássica possui grande dependência com o percentual de minério lavrado na frente 02, uma vez que este minério possui o mineral apatita com maior grau de liberação e, dessa forma, facilita o processo de flotação. A vazão de ar da etapa *Rougher* apresentou-se próximo ao limite superior da faixa experimental enquanto a vazão de ar da etapa *Cleaner* mais próxima ao limite inferior.

Para explicar melhor a relação entre a recuperação mássica e as variáveis independentes, foram elaboradas superfícies resposta, que estão apresentadas nas Figuras 2 e 3. E, em todas as superfícies de resposta, as variáveis independentes não apresentadas estão no nível central.

A Figura 2, mostra a superfície de resposta que relaciona a recuperação mássica da flotação da flotação industrial de apatita ultrafina (RM_{ASSUF}) e as variáveis dosagem de depressor (d_{depre}) e dosagem de coletor (d_{col}).

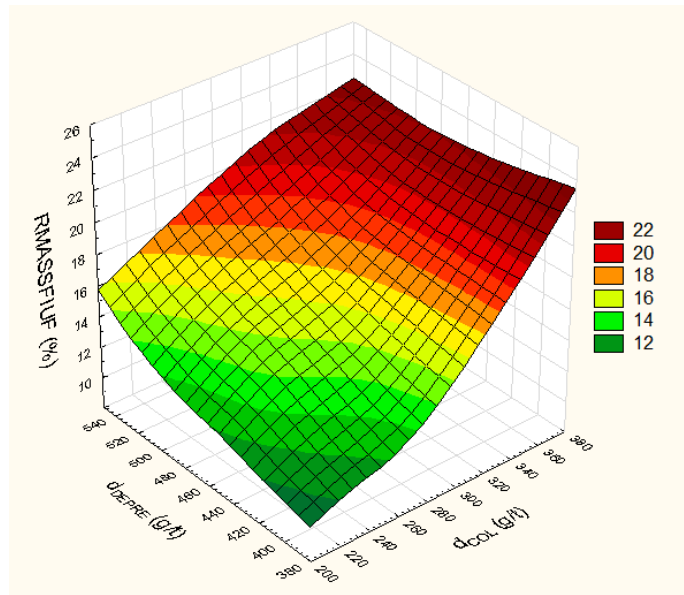


Figura 2. Superfície de resposta da recuperação mássica em função das dosagens de depressor e coletor.

Analisando a Figura 2, percebe-se que a recuperação mássica é mínima para dosagens de depressor e coletor menores do que 420 g/t e 300 g/t, respectivamente. A baixa dosagem dos reagentes causa a sedimentação de partículas de apatita para o rejeito. No entanto, quando as dosagens são elevadas, a recuperação mássica tende a subir até atingir valores próximos de 24%.

Já na Figura 3, tem-se a superfície de resposta da recuperação mássica da flotação da flotação industrial de apatita ultrafina (RMASSTUF) em função das vazões de ar das colunas de flotação Rougher ($v_{a_{roug}}$) e Cleaner ($v_{a_{clean}}$).

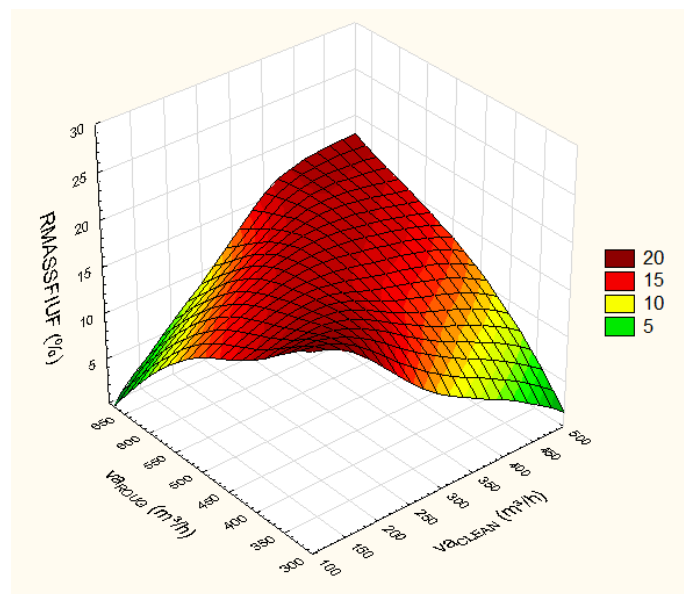


Figura 3. Superfície de resposta da recuperação mássica em função das vazões de ar das colunas de flotação.

Na Figura 3, nota-se-se que a recuperação mássica atinge valores máximos vazões de ar elevadas. Nesta situação, a etapa *Rougher* produz concentrado em excesso, transferindo-o à etapa *Cleaner* que, por sua vez coleta a massa proporcionalmente. É importante ressaltar que neste cenário há ganhos significativos de produção somente quando o minério apresenta apatita límpida e altamente recuperável. Já quando a vazão de ar da etapa *Rougher* é mínima e a da etapa *cleaner* máxima, a recuperação cai significativamente, pois muita massa é transferida da etapa *Rougher* para a *Scavenger* gerando acréscimos de perdas no rejeito final.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados do estudo, conclui-se estatisticamente que para dosagens de depressor e de coletor abaixo de 420 e 300 g/t, respectivamente, a recuperação mássica do concentrado com teor de, no mínimo, 35% de P_2O_5 , é baixa. Portanto, não seria recomendado operar com dosagens abaixo destes valores.

À medida que se eleva a dosagem de depressor e coletor, a recuperação mássica aumenta até atingir valores próximos de 24%.

6. REFERÊNCIAS

BARROS, L. A. F. Concentração de minérios fosfáticos. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Flotação - O estado da arte no Brasil. São Paulo, Ed. Signus, 2006. vol.4, p. 83-122.

BARROS, L. A. F. Flotação da apatita da jazida de Tapira-MG. São Paulo. 1997. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997.

BOX, M. J.; HUNTEL, W. G; HUNTEL, J. S. Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building, John Wiley and Sons, New York, 1978.

CHAVES, A.P.; LEAL FILHO, L.S. Flotação. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; MONTE, M.B.M.; ALMEIDA, S.L.M. Tratamento de Minérios. 3 ed. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2002, p. 409-455.

SANTANA, R.C. Análise da influência do tamanho da partícula na flotação da apatita em coluna. Uberlândia. 2007. 166p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SANTOS, M.A.; SANTANA, R.C.; CAPPONI, F.; ATAIDE, C.H.; BARROZO, M.A.S. Effect of ionic species on the performance of apatite flotation, Separation and Purification Technology, 2010, vol.76, p. 15-20.

WOODBURN, E. T.; KING, R. P.; COLBORN, R. P. The effect of particle size distribution on the performance of a phosphate flotation process, Metallurgical Transactions, 1971, vol. 2, p. 3163-3173.