

## ESTUDO DO EFEITO DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS SOBRE A EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DE UMA PENEIRA VIBRATÓRIA EM ESCALA PILOTO

F. S. GUERREIRO<sup>1\*</sup>, V. P. BARBOSA<sup>1</sup>, R. GEDRAITE<sup>1</sup>, C. H. ATAÍDE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química  
\*e-mail: fernando\_guerreiro18@yahoo.com.br

### RESUMO

O peneiramento vibratório continua sendo uma das principais operações no que se refere à separação sólido-sólido e sólido-líquido. Embora seja um equipamento de simples concepção e operação, a descrição completa do funcionamento de uma unidade peneiramento pode ser difícil de ser predito, considerando que diversas variáveis operacionais podem afetar esta operação. Assim, o objetivo deste estudo foi a avaliação dos efeitos das variáveis de processo: proporção de partículas maiores que a abertura da tela na alimentação (partículas grossas); taxa média de alimentação e força-g imposta à peneira sobre a eficiência de separação de partículas grossas da operação de peneiramento em escala piloto, sendo que o material particulado a ser peneirado foi a rocha fosfática, de densidade 3,25 g/cm<sup>3</sup> e com faixa de tamanho de partículas de 0,6 a 600 µm. Um planejamento composto central (PCC) foi criado para a avaliação dos efeitos lineares, quadráticos e de interação entre as variáveis de processo. Os resultados foram analisados estatisticamente e um ajuste não-linear foi realizado para a estimativa dos efeitos das variáveis sobre a eficiência. Verificou-se que a taxa média de alimentação não teve efeito significativo e a proporção de partículas grossas na alimentação e a força-g influenciaram positivamente o aumento da resposta avaliada. No ponto onde as variáveis assumem seus valores mais extremos, a eficiência máxima experimental foi de 94,93%.

### 1 INTRODUÇÃO

O peneiramento ainda é considerado uma das mais antigas operações unitárias de relevância para a separação e classificação nas indústrias e também é largamente utilizado como método de caracterização de distribuição de tamanho de partículas (LIU, 2009). Existem diversos objetivos para se realizar o peneiramento nas indústrias do setor de mineração, como por exemplo, classificação, para separar partículas de acordo com o tamanho; “scalping”, para remoção de partículas mais grosseiras de uma corrente e desaguamento, para remoção do excesso de água de um material úmido (WILLS; MUNN, 2006). O penei-

ramento também é importante na perfuração de poços de petróleo, onde o objetivo desta operação é o de maximizar a recuperação de fluido de perfuração agregado aos cascalhos gerados pela broca e também maximizar a retenção deste material sólido sobre a tela da peneira (AADE, 1999).

O peneiramento é uma operação unitária de simples execução, entretanto a descrição matemática e entendimento detalhado dessa operação podem não ser triviais (STANDISH, 1985; LESCHONSKI, 1979). Essas dificuldades baseiam-se no fato que muitas variáveis afetam a operação de uma peneira vibratória típica, tais como: a tela de peneiramento (formato e tamanho das abertu-

ras), a amplitude e frequência de vibração, o ângulo de inclinação da cesta da peneira, densidade e distribuições de tamanho e forma das partículas a serem peneiradas e a quantidade de material alimentado (JANSEN; GLASTONBURY, 1967; FOWLER; LIM, 1959). Além disso, tem-se as diversas interações entre essas variáveis, fato que concede a operação um grau de complexidade ainda maior. Todas essas características são utilizadas para entender porque ainda não foi desenvolvida uma metodologia geral e eficiente para predição da operação de peneiramento (LIU, 2009).

O efeito de algumas variáveis operacionais sobre o desempenho do peneiramento vibratório tem sido alvo de investigação de diversos autores. No peneiramento a seco, Fowler e Lim (1959) investigaram os efeitos da taxa de alimentação, frequência de vibração, ângulo de inclinação e tamanho de abertura da tela sobre a efetividade de uma peneira vibratória. Beekmans et al. (1985) estudaram o comportamento do diâmetro de corte sobre a influência do ângulo de inclinação, taxa de alimentação, frequência e amplitude de vibração, abertura de tela e densidade dos sólidos utilizados nos experimentos. Standish et al. (1986) estudaram o efeito da alimentação, ângulo da cesta, rotação dos motovibradores, proporção de partículas de tamanho superior à abertura da tela, densidade e tamanho relativo de partículas sobre a eficiência de peneiramento com uma abordagem cinética. Trumic e Magdalinovic (2011) também realizaram uma análise cinética de peneiramento de sólidos minerais para avaliar a influência de fatores como dimensões da tela de peneiramento, distribuição de tamanho de partícula, formato dos materiais particulados, a massa inicial de sólidos e densidade.

Assim, o objetivo maior deste estudo foi avaliar os efeitos de algumas das variáveis de processo que afetam a desempenho de uma peneira vibratória em escala piloto. Foram consideradas a proporção de partículas maio-

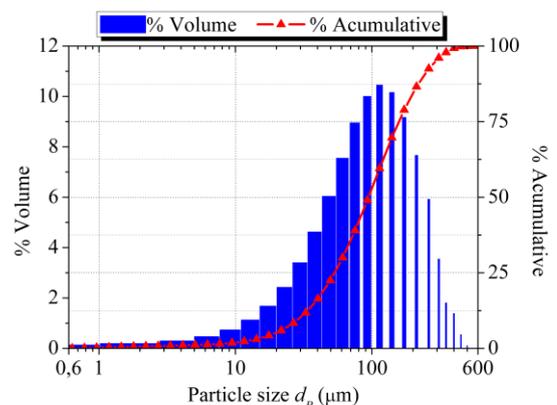
res que a abertura da tela na alimentação, a taxa média de alimentação e a força-g da peneira sobre a eficiência de separação de partículas grossas na operação de peneiramento, sendo o material particulado a rocha fosfática, de densidade  $3,25 \text{ g/cm}^3$  e com faixa de tamanho de partículas de  $0,6$  a  $600 \mu\text{m}$ .

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material Particulado para Peneiramento

Para a realização dos experimentos, o sólido utilizado foi a rocha fosfática. A escolha deste material particulado deu-se pela sua importância em nível regional e por ser matéria-prima para indústrias de fertilizantes fosfatados (VIEIRA, 2006). A densidade da rocha fosfática foi determinada por picnometria a gás hélio (picnômetro *Micromeritics AccuPyc 1330*) e vale  $3,25 \text{ g/cm}^3$ . A Figura 1 apresenta a distribuição de tamanho de partículas referente ao material particulado, que foi determinada por difração a laser utilizando o analisador *Mastersizer 2000*. Observou-se que a rocha fosfática utilizada possui faixa de tamanho de  $0,6$  a  $600 \mu\text{m}$ .

**Figura 1** - Distribuição de tamanho de partículas da rocha fosfática



Fonte: Autor (2015)

## 2.2 Planejamento de Experimentos

Por permitir uma identificação e quantificação mais precisa dos efeitos das variáveis selecionados para este estudo, um planejamento composto central (PCC) foi criado e a técnica da superfície de resposta foi utilizada para obtenção dos pontos ótimos (MOGNON et al., 2015). Foram definidas como variáveis independentes:

- *Proporção de partículas maiores que a abertura da tela (partículas grossas) na alimentação ( $X_1$ ):* antes do início dos experimentos, as partículas maiores que as aberturas da tela foram separadas das partículas menores. Ambas as populações de sólidos foram condicionadas em recipientes distintos.
- *Taxa média de alimentação ( $X_2$ ):* a quantidade de sólidos finos e grossos referente a cada experimento foi medida, sendo que o tempo de operação foi fixado em 5 min. A alimentação foi realizada ao início da peneira de forma gradual até que toda a massa fosse esgotada dentro do tempo de operação do experimento.
- *Força-g imposta à peneira ( $X_3$ ):* é definida como a razão entre a aceleração vibracional e a aceleração gravitacional da Terra, sendo dependente da frequência de vibração da peneira, que foi manipulada para alterar os valores desta variável quando necessário.

Considerando as três variáveis apresentadas, o planejamento compreende 17 experimentos, dos quais três são réplicas no ponto central. Esse número de réplicas foi definido de forma que o alfa de ortogonalidade, ou seja, os valores codificados dos pontos axiais ( $+\alpha$  e  $-\alpha$ ) fossem 1,353 e  $-1,353$ . A Tabela 1 apresenta o PCC, em sua forma codificada, para a realização dos experimentos deste trabalho.

**Tabela 1** - Matriz do PCC utilizado neste trabalho, com três réplicas no ponto central.

Experimento	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1
9	0	0	$-\alpha$
10	0	0	$+\alpha$
11	0	$-\alpha$	0
12	0	$+\alpha$	0
13	$-\alpha$	0	0
14	$+\alpha$	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0

Fonte: Autor (2015)

A Tabela 2 fornece os valores e a correspondência de cada variável com seu nível de codificação.

**Tabela 2** - Variáveis e níveis para o PCC.

Nível	%Grosso	Taxa Alim.	Força-g
-1,353	23	0,8	1,47
-1	30	1,0	2,00
0	50	1,6	3,50
+1	70	2,2	5,00
+1,353	77	2,4	5,53

Fonte: Autor (2015).

## 2.3 Variável Resposta

Em um peneiramento ideal, todas as partículas maiores que as aberturas da tela estão presentes na corrente de material retido, resultando em uma eficiência de separação de 100%. Porém em um peneiramento real, as partículas grossas podem passar pela tela.

Este efeito pode ser explicado pela irregularidade da superfície de peneiramento, vazamento entre a tela e a cesta da peneira, irregularidades de formato das partículas ou à carga excessiva sobre a tela, que pode forçar essas partículas grossas a passar pelas aberturas (MOREIRA, 2003).

Assim, neste trabalho, a eficiência de separação de partículas grossas ( $\eta_G$ ) foi determinada a partir da distribuição granulométrica das amostras coletadas na saída e na entrada da peneira. Foi calculada a partir da Equação (1) (LARSON, 2007):

$$\eta_G (\%) = 100 \frac{W_R \left( 1 - Y_R \Big|_{d_p \rightarrow 130 \mu m} \right)}{W_F \left( 1 - Y_F \Big|_{d_p \rightarrow 130 \mu m} \right)} \quad (1)$$

em que  $W_R$  e  $W_F$  são as massas de sólido nas correntes de material retido e alimentação, respectivamente;  $Y_R$  e  $Y_F$  são as distribuições acumulativas de tamanho de partícula de amostras das correntes de material retido e da alimentação, respectivamente, até o tamanho  $d_p$  igual ao tamanho de abertura da tela ( $130 \mu m$ ).

## 2.4 – Unidade Experimental

Um esquema da unidade experimental utilizada é apresentado na Figura 2.

Seus principais componentes são listados a seguir:

- 1) Tela de peneiramento de  $130 \mu m$  de abertura;
- 2) Motovibradores;
- 3) Acelerômetro piezelétrico para medir a vibração da peneira;
- 4) Placa de aquisição de dados da *National Instruments*;
- 5) Inversor de frequência para ajustar a rotação dos motovibradores.

**Figura 2** - Unidade experimental para realização dos experimentos



Fonte: Autor (2015)

## 2.5 Peneira Vibratória

A peneira vibratória utilizada nos experimentos possui as seguintes características:

- Dimensões de 1,65 m de comprimento; 0,81 m de largura e 1,00 m de altura;
- Dois motovibradores de 0,75 cv que impõem movimentação linear ao sistema de peneiramento;
- Quadro para montagem da tela de 1,0 m x 0,4 m de área de peneiramento.

Optou-se por inclinar a peneira de maneira descendente visando proporcionar um melhor transporte do sólido retido (HOBEROCK, 1981). O valor da inclinação da peneira em relação ao piso foi estimado em  $2,25^\circ$ .

## 2.6 Metodologia Experimental

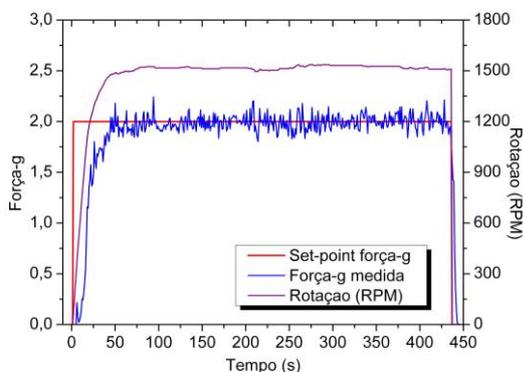
A execução dos experimentos seguiu a seguinte metodologia:

- Montagem da tela e preparação do material sólido a ser alimentado;
- Início do peneiramento com o descarregamento do sólido sobre a peneira. A partir desse instante contabilizava-se o tempo de operação;
- Ajuste da força-g através de um algoritmo de controle proporcional criado no

software *Labview* que recebia, através de uma placa de aquisição de dados, o sinal de corrente gerado pelo acelerômetro e manipulava a rotação dos motovibradores pelo inversor de frequência. O controle da força-g foi necessário, já que seu valor diminui à medida que a suspensão vai sendo alimentada à peneira (EL DORRY, 2010). Na Figura 3 é exemplificada a aquisição de dados a partir das informações obtidas do experimento 1;

- Término da operação quando esgotada toda a alimentação no tempo de 5 minutos e a vibração era interrompida. O material retido era coletado em um tanque e devidamente pesado, e o material passante pelas aberturas da tela era descarregado em outro tanque de coleta;
- Coleta de amostras dos sólidos retidos e da alimentação para análise de distribuição de tamanho de partícula.

**Figura 3** - Aquisição de dados para controle da força-g no experimento 1.



Fonte: Autor (2015)

## 2.7 Tratamento de Dados

Os resultados obtidos experimentalmente foram sujeitos à análise de regressão múltipla para quantificação dos efeitos lineares das variáveis, bem como as interações e as contribuições quadráticas sobre as respostas, permitindo o ajuste de um modelo de 2ª ordem descrito pela Equação (2).

$$\eta(\%) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j < i}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

Os parâmetros não significativos foram eliminados através do teste *t* de *Student*, considerando um nível de 10% de significância. Todas as análises estatísticas foram conduzidas com o emprego do software *Statistica 7.1*.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 mostra os resultados para cada experimento.

**Tabela 3** - Resultados experimentais da eficiência de separação para cada experimento.

Experimento	$\eta_G$ (%)	Experimento	$\eta_G$ (%)
1	75,88	10	89,35
2	73,03	11	83,03
3	75,29	12	83,16
4	76,02	13	64,68
5	90,73	14	92,36
6	92,43	15	82,45
7	90,66	16	81,72
8	92,97	17	83,86
9	81,79		

Fonte: Autor (2015)

A partir da Tabela 3 é possível constatar que os experimentos caracterizados por proporções de partículas grossas na alimentação maiores que 70% (5, 6, 7, 8 e 14) conduziram aos maiores valores de eficiência ( $\eta_G > 90\%$ ), indicando a forte influência desta variável na resposta analisada. Uma possível explicação para este resultado é que, quanto menor a quantidade de partículas finas na alimentação, menor a chance de elas ficarem retidas na peneira.

A Equação (3) apresenta os parâmetros significativos do ajuste da eficiência de separação de partículas grossas. O quadrado do

coeficiente de correlação  $R^2$  para este ajuste foi de 0,96.

$$\eta_G(\%) = 82,78 + 8,92X_1 - 1,83X_1^2 + 1,04X_3 + 2,02X_3^2 \quad (3)$$

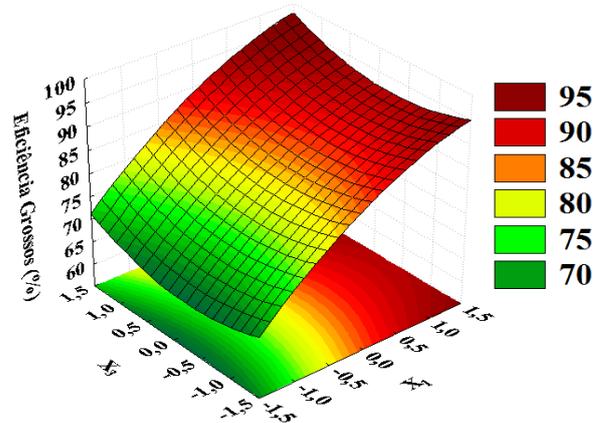
Analisando a Equação (3), nota-se que a eficiência não é afetada significativamente pela taxa de alimentação ( $X_2$ ). Uma vez que o desejado é alcançar o maior valor para esta resposta na região experimental, observa-se que o termo linear de proporção de partículas grossas ( $X_1$ ) foi o mais significativo, além de ter contribuído para o aumento da eficiência. Os termos significativos associados à força-g ( $X_3$ ) também contribuíram para o aumento da resposta.

Na Figura 4 são apresentadas a superfície de resposta e a sua projeção que representam o comportamento da eficiência de separação de partículas grossas em relação às variáveis independentes. Foi observado que a região de maior eficiência dentro da região experimental foi aquela correspondente aos maiores níveis de  $X_1$  e  $X_3$ .

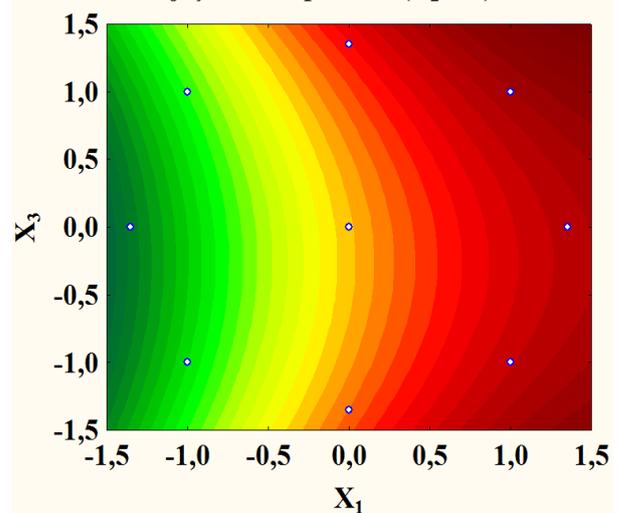
Em conjunto com a Equação (3), o ponto ótimo foi aquele correspondente ao maior nível das variáveis ( $+\alpha$ ), resultando em uma eficiência calculada de 96,59%. Porém o PCC proposto não contempla o experimento com o maior nível para todas as variáveis. Assim, fez-se necessária a validação experimental deste ponto adicional, sendo obtido o valor de 94,93%, sendo assim, um erro de ajuste relativo de 1,75%, o que pode ser considerado satisfatório devido ao  $R^2$  calculado pela regressão.

**Figura 4** - Superfície de resposta e sua projeção correspondentes à eficiência de separação de partículas grossas.

**Superfície de resposta ( $X_2 = 0$ )**



**Projeção da superfície ( $X_2 = 0$ )**



Fonte: Autor (2015)

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos neste trabalho, foi possível concluir que a taxa média de alimentação não teve efeito sobre a eficiência de separação de partículas grossas e a proporção de partículas grossas na alimentação e a força-g influenciaram positivamente o aumento da resposta avaliada. O ponto ótimo alcançado através da regressão e da superfície de resposta foi aquele correspondente ao nível mais extremo de todas as variáveis, sendo validado experimentalmente como 94,93%.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS (AADE). **Shale Shakers and Drilling Fluid Systems**. Houston: Gulf Publishing Company, 1999.
- BEECKMANS, J. M., GERMAIN, E. R., MCINTYRE, A. **Performance Characteristics of a Probability Screening Machine**. *Powder Technology*, p. 249-256, 1985.
- EL DORRY, K. **Effect of Constant-G Control on Shale Shaker Performance**. AADE Fluids Conference and Exhibition. Houston, Texas, 2010
- FOWLER, R. T., LIM, S. C. The Influence of Various Factors upon the Effectiveness of Separation of a Finely Divided Solid by a Vibrating Screen. **Chemical Engineering Science**, 1959.
- HOBEROCK, L. L. Screen Selection is Key to Shale-Shaker Operation. **Oil & Gas Journal**, 130-132, p. 137-141, 1981.
- JANSEN, M. L., GLASTONBURY, J. R. (1967). The Size Separation of Particles by Screening. **Powder Technology**, p. 334-343.
- LARSON, R. T. **API RP 13C D100 Values, Split Curves, and Separation Efficiency**. Houston, Texas: AADE National Technical Conference and Exhibition, 2007.
- LESCHONSKI, K. Sieve analysis, the Cinderella of particle size analysis methods? **Powder Technology**, p. 115-124, 1979.
- LIU, K. Some Factors Affecting Sieving Performance and Efficiency. **Powder Technology**, 2009.
- MOGNON, J. L.; SILVA, J. M.; BICALHO, I. C.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R. Modular Mini-Hydrocyclone Desilter Type of 30 mm: An Experimental and Optimization Study. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 129, p. 145-152, 2015.
- STANDISH, N. The Kinetics of Batch Sieving. **Powder Technology**, p. 57-67, 1985.
- STANDISH, N., BHARADWAJ, A. K., HARIRI-AKBARI, G. A Study of the Effect of Operating Variables on the Efficiency of a Vibrating Screen. **Powder Technology**, 48, p. 161-172, 1986.
- TRUMIC, M., MAGDALINOVIC, N. New Model of Screening Kinetics. **Minerals Engineering**, p. 42-49, 2011.
- VIEIRA, L. G. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. Tese (doutorado). Uberlândia, MG, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- WILLS, B. A., MUNN, T. J. **Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery** (7<sup>a</sup> ed.). Elsevier Science & Technology Books, 2006.