

AVALIAÇÃO DE SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDADE DE ANEL VERTICAL

M. B. Silva, J. A. M. da Luz, M. M. Lopes & C. A. Pereira
Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro
maximilianobs@yahoo.com.br; jaurelioluz@gmail.com; bhmarinalopes@gmail.com;
pereira@demin.ufop.br

RESUMO

O *Vertical Ring and Pulsating High Gradient Magnetic Separator* (VRPHGMS) foi desenvolvido para superar as desvantagens do tradicional tipo de separador magnético de alta intensidade de anel horizontal (WHINS); tecnologia há décadas disponível para separação de materiais paramagnéticos, mas tradicionalmente ineficiente para alimentação fina (-100 μm) segundo Hearn (2007). Em tratamento de minérios há problemas cujas soluções requerem o estudo simultâneo de várias propriedades, sendo essas, por um grande número de fatores, experimentais. O uso de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos (conforme R. L. Plackett e J. P. Burman) possibilita extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil com um número mínimo de experimentos, reduzindo o número de ensaios sem prejudicar a qualidade da informação, propiciando o estudo simultâneo de variáveis, determinando a confiabilidade dos resultados através da realização da pesquisa em etapas num processo iterativo que permite o acréscimo de novos ensaios para melhor determinação de variáveis que influenciam o processo com número reduzido de ensaios. Com o intuito de minimizar custos e trabalho diminuindo o número de experimentos, mas sem prejudicar a qualidade da informação, este estudo objetiva testar, por meio do uso de ferramentas estatísticas, o equipamento separador magnético de alta intensidade de anel vertical piloto capaz de alimentar (*Vertical Ring and Pulsating High Gradient Magnetic Separator*), determinando a recuperação do Fe e o rendimento mássico como importantes variáveis respostas a serem analisadas de forma a fazer um recorte mais preciso do objeto de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento de experimento, Plackett-Burman, Separação Magnética.

1. INTRODUÇÃO

O Vertical Ring and Pulsating High Gradient Magnetic Separator (VRPHGMS) foi desenvolvido para superar as desvantagens do tradicional tipo de separador magnético de alta intensidade de anel horizontal, o WHINS (Wet High Intensity Magnetic Separator), equipamento que vem sendo empregado por décadas para recuperar minério de ferro e outros minerais, com o sucesso comprovado em diversas plantas de processamento mineral na China recuperando minérios de ferro de baixo teor (Zeng, 2003). Devido às propriedades paramagnéticas da hematita, na qual a susceptibilidade magnética cresce na presença de um campo magnético poderoso, uma técnica utilizada na recuperação de minério de ferro é o WHIMS.

A separação magnética como operação industrial ganhou força com o advento de equipamentos contínuos que produzem altos gradiente e intensidade de campo. Isso permitiu a separação exitosa de materiais paramagnéticos em mistura com diamagnéticos, desde que haja grau de liberação e granulação adequados. Citam-se como exemplo: enriquecimento de itabiritos finos, separação de diamantes de granadas, purificação de alumina, bauxitos, calcários, argilas, feldspato, areias quartzosas, etc. (Daniels, 1989).

Em separadores magnéticos de alto gradiente, a resistência fluidodinâmica à passagem da polpa pela matriz depende da configuração geométrica desta, em especial de sua fração de vazios (por onde deve fluir a polpa não magnética). Por outro lado, a existência de quinas e arestas favorece a magnitude dos gradientes locais, devido ao chamado poder das pontas, o que, em geral, implica maior índice de tortuosidade e, portanto, maior resistência fluidodinâmica.

Especificamente para os separadores via úmida de alta intensidade, um dos presentes autores desenvolveu a seguinte equação para a previsão da capacidade de tratamento de minérios de ferro médios do Quadrilátero Ferrífero (Luz, 2010). A dita equação, com todas as unidades no SI, fornece o valor da vazão mássica de alimentação, em função do diâmetro nominal do carrossel do separador e da abertura dos vãos (*gap*) na matriz ferromagnética (para a condição matemática de o diâmetro ser inferior a 4 m):

$$Q_a = 380 \times \left(\frac{d}{4-d} \right)^{0,48} \times a^{0,498} \quad (1)$$

Onde:

Q_a – vazão mássica de alimentação de material com dois carrosseis [kg/s];

a – abertura efetiva das placas ranhuradas (*gap*) [m];

d – diâmetro do carrossel [m].

Em tratamento de minérios há problemas cujas soluções requerem o estudo simultâneo de várias propriedades através da realização de experimentos. Mas como investigar tais efeitos de forma a minimizar o trabalho e controlá-lo para que a qualidade do produto seja assegurada?

Segundo Neto (2007), com o uso de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos pode-se extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil com um número mínimo de experimentos. Button (2010) destaca como benefício da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental: a redução no número de ensaios sem prejudicar a qualidade da informação; estudo simultâneo de diversas variáveis; determinação da confiabilidade dos resultados; realização da pesquisa em etapas num processo interativo de acréscimo de novos ensaios; determinação de variáveis que influenciam o processo com número reduzido de ensaios.

De acordo com R. L. Plackett e J. P. Burman, dispendo de condições materiais para realizar 8, 16, 32,..., 2^m pode-se empregar planejamentos saturados e com eles estudar a influência de até 7, 15, 31,..., 2^{m-1} fatores. Tais planejamentos permitem estimar todos os $k = n-1$ efeitos principais (onde n representa o número de ensaios) com variância mínima (Neto, 2003; apud Plackett Burman,

1946). Os $n/2$ sinais positivos de qualquer coluna sempre correspondem, nas demais colunas, a $n/4$ sinais positivos e $n/4$ sinais negativos. O mesmo ocorre com os sinais negativos, ou seja, as colunas são todas ortogonais, e essa simetria permite que os efeitos principais de cada fator sejam determinados individualmente, admitindo-se que os efeitos das interações sejam desprezíveis.

Por meio do uso de ferramentas estatísticas, este estudo tem como objetivo: testar o equipamento separador magnético de alta intensidade de anel vertical piloto capaz de alimentar (Vertical Ring and Pulsating High Gradient Magnetic Separator), determinando quais variáveis são importantes de forma a fazer um recorte mais preciso do objeto em estudo. Para tal apresentaremos, nos tópicos a seguir, os materiais e métodos utilizados neste estudo, bem como os resultados e as conclusões obtidas após a realização do teste.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A recuperação do Fe e o rendimento mássico são as variáveis respostas a serem analisadas neste estudo. Será definido neste tópico: a caracterização tecnológica da alimentação em questão; a representação esquemática do equipamento utilizado e seu princípio de funcionamento. Apontar-se-á: a metodologia adotada nos testes, a definição das variáveis; o plano de testes e os procedimentos realizados; o efeito da variável; a variância entre os testes; o erro padrão dos efeitos e a significância estatística dos efeitos. O material usado no teste foi o underflow do espessador de lamelas de uma usina de tratamento de minério de ferro do quadrilátero ferrífero. A caracterização tecnológica da alimentação em questão está resumida nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Tabela I – Composição percentual da amostra global (expressa em termos de elementos e óxidos na calcina, com fechamento totalizando 99,57 %)

Alumina	Ferro	Manganês	Fósforo	Perda por calcinação	Sílica	Cal	Magnésia	Titânia
Al ₂ O ₃	Fe	Mg	P	ppc	Si ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂
2,62	30,53	0,5	0,056	3,76	46,23	0,08	2,40	0,051

Tabela II – Química de Fe e SiO₂ por faixa granulométrica

Malha #	Abertura (μm)	Porcentagens			Teores (%)		Distribuição (%)	
		Retida	Retida por Faixa	Passante	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
32	500	0,03	0,89	99,97	11,98	79,03	0,352	1,483
48	300	0,20		99,77				
65	212	0,66		99,11				
100	150	3,18	23,78	95,93	12,6	80,58	9,904	40,400
200	75	20,60		75,33				
250	63	9,58	14,11	65,75	27,48	59,38	12,816	17,665
270	53	4,53		61,22				
325	45	2,55	10,13	58,67	35,93	45,47	12,031	9,711
400	37	7,58		51,09				
-400	-37	51,09	51,09	0,00	38,43	28,54	64,897	30,742
TOTAL		100,00			30,25	47,43	100,00	100,00

Tabela III – Mineralogia

MINERALOGIA															
Malhas (mm)	% Retida Simples	MINERAIS % MASSA													
		HE	HG	HL	HM	MA	GO	QZ	MN	CA	GB	MI	TA	OT	Total
-1,0 + 0,15'	8,4	8,8	0,5	1,2	3,0	0,3	12,9	65,3	0,6	0,8	0,2	6,2	0,0	0,0	100
-0,15 + 0,075'	42,7	15,1	2,9	0,0	6,1	0,3	4,8	70,3	0,2	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	100
-0,075 + 0,053'	27,9	20,3	14,4	0,0	10,2	2,2	4,0	48,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
-0,053 + 0,037'	21,0	10,2	22,3	0,0	21,2	3,3	7,7	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
'Global'	100,00	15,0	10,0	0,1	10,1	1,5	5,9	56,6	0,1	0,1	0,0	0,7	0,0	0,0	100
LEGENDA															
HE= Hematita Especular				MA= Magnetita				MN= Manganês				TA = Talco			
HG= Hematita Granular				GO= Goethita				CA= Caulinita				OT= Outros			
HL= Hematita Lobular				QZ= Quartzo				GB= Gibbsita							
HM= Hematita Martítica				QM= Quartzo misto				MI = Mica							
Observações															
<i>Metodologia</i>															
<ul style="list-style-type: none"> As análises foram realizadas em microscópio ótico de luz refletida. Análise por contagem de partículas/cristais (mínimo de 500 partículas/cristais em cada malha) Foi quantificado também o grau de liberação de quartzo. Granulometria dos cristais de quartzo é média (40 a 110 micra) Não foi realizada análise mineralógica da lama Partícula mista com percentual de quartzo inferior a 10% foi considerada como partícula de hematita livre. Partícula mista com percentual de hematita inferior a 10% foi considerada como partícula de quartzo liberado 															

Tabela IV – Grau de liberação do Quartz

Grau de Liberação do QZ			
Malhas (mm)	QL	QM	GL
-1,0 + 0,15'	384	1	99,7
-0,15 + 0,075'	435	0	100,0
-0,075 + 0,053'	344	0	100,0
-0,053 + 0,037'	374	0	100,0

Com base nos dados apresentados nas quatro tabelas acima, percebe-se que: a sílica, principal contaminante, encontra-se totalmente liberada dos minerais de ferro; o material não é favorável para flotação de ultrafinos devido à presença de hematitas especulares, martíticas e goethita; o material é favorável a separação magnética de alta intensidade devido aos baixos teores de magnetita e alta liberação da sílica.

Os testes foram realizados num equipamento semi-industrial com capacidade de alimentação de 7t/h, com velocidade de rotação fixa em 3rpm, capacidade de geração de campo magnético máximo de 20.000G e sistema de pulsação chegando a 400ciclos/minuto.

Exposta a caracterização tecnológica da alimentação em questão e o princípio de funcionamento do equipamento, apontemos a seguir as variáveis testadas, as quais são representadas na tabela 5. Seguindo a metodologia de Plackett-Burman, foram definidos níveis máximos (+) e mínimos (-) para cada uma das variáveis. Foram definidas duas variáveis fictícias que são inertes e são empregadas para estimar o erro associado.

Tabela V – Definição de variáveis

Variáveis		Uni	-	+
A	Campo	G	2000	10000
B	Pulsção	Pulsos/min	100	400
C	Sólidos	%	20	50
D	Fictícia	n.a.	0	0
E	Matriz	mm	1	3
F	Água lavagem	Nível	Média	Alta
G	Fictícia	n.a.	0	0

Definidas as variáveis conforme apresentadas na tabela 5, o plano de teste é estabelecido conforme demonstrado na tabela 6, segundo a metodologia Plackett-Burman, gerando oito testes para oito variáveis, sendo duas delas fictícias.

Tabela VI – Plano de testes

Teste	Campo A	Pulsção B	Sólidos C	Fictícia D	Matriz E	Água lavagem F	Fictícia G
1	10000	400	50	-	3	Média	-
2	2000	400	50	+	1	Alta	-
3	2000	100	50	+	3	Média	+
4	10000	100	20	+	3	Alta	-
5	2000	400	20	-	3	Alta	+
6	10000	100	50	-	1	Alta	+
7	10000	400	20	+	1	Média	+
8	2000	100	20	-	1	Média	-

A recuperação do Fe e o rendimento mássico foram as variáveis respostas analisadas. Os testes foram realizados com uma pilha pré-definida e homogeneizada. Foram feitos de forma aleatória, com intervalo mínimo de 10 minutos entre as regulagens dos parâmetros de interesse do estudo. O trabalho começou depois da entrada em regime do circuito e ocorreu sem interrupções. A amostragem foi realizada com o objetivo de gerar dados confiáveis para análise química, balanço de massas e balanço metalúrgico.

Apontaremos a seguir: efeito da variável - EA; a variância entre os testes - Vef; o erro padrão dos efeitos - EP; e significância estatística dos efeitos T- Student.

O efeito da variável - EA, dado por ⁽¹⁾:

$$E_A = \frac{\sum R(+)-\sum R(-)}{\frac{n}{2}} \quad (2)$$

Onde: EA = Efeito da variável A

R(+) = Resultado com os testes onde a variável foi utilizada no nível máximo

R(-) = Resultado com os testes onde a variável foi utilizada no nível mínimo

n = número de testes

A variância entre os testes foi analisada através das variáveis fictícias e é calculada pela seguinte fórmula ⁽²⁾:

$$V_{ef} = \frac{\sum (E_f)^2}{m} = \frac{E_{f1}^2 + E_{f2}^2 + E_{f3}^2 \cdots + E_{fm}^2}{m} \quad (3)$$

Onde:

Vef = Variância

Ef = efeito da variável

m = número de variáveis fictícias

Erro padrão dos efeitos – EP e significância estatística dos efeitos T- Student ⁽³⁾:

$$E.P_{ef} = \sqrt{V_{ef}} \quad (4)$$

Onde:
 EP = Erro Padrão
 V_{ef} = Variância

A significância estatística dos efeitos é calculada por ⁽⁴⁾:

$$t_A = \frac{E_A}{E.P_{ef}} \quad (5)$$

Onde:
 t_A = T-Student
 E_A = Efeito da Variável
 EP = Erro Padrão

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados obtidos, observemos a recuperação em massa do material apresentada abaixo na tabela 7.

Tabela VII - Resultados da variável resposta recuperação

Recuperação			
Variâncias Fictícias		12,09	
Erro Padrão Fictícias		3,48	
Variável	Efeito	T	Significância
A	62,77	18,05	100,00
B	8,99	2,59	96,38
C	64,03	18,41	100,00
D	2,65	0,76	52,91
E	- 3,87	1,11	69,75
F	85,25	24,52	100,00
G	- 19,49	5,61	99,92

Para a recuperação em massa, percebemos que as três variáveis que mais impactaram o resultado foram campo, água de lavagem e percentual de sólidos, de acordo com a significância de cada uma delas verificada na tabela t-de-Student. A maior recuperação do campo deve-se a capacidade de atração de maiores massas em maiores gradientes. O percentual de sólidos, como para outros métodos físicos de concentração, impacta sobremaneira na geração de massa e, como veremos na análise do teor de concentrado, na seletividade do processo. No caso da água de lavagem, também era de ser esperar uma piora no processo para dosagens mínimas, uma vez que permitirá que materiais magnéticos retornem para o sistema em vez de serem coletados na caixa de concentrado. A tabela 8 apresenta o efeito da variável resposta teor de Fe no concentrado:

Tabela VIII - Resultados da variável resposta teor de ferro no concentrado

FeT			
Variâncias Fictícias		10,48	
Erro Padrão Fictícias		3,24	
Variável	Efeito	T	Significância
A	10,95	3,38	98,83
B	-15,32	4,73	99,79
C	-35,93	11,10	100,00
D	-10,11	3,12	98,32
E	15,77	4,87	99,82
F	-14,13	4,36	99,67
G	15,27	4,72	99,78

O resultado do impacto na seletividade do processo é mostrado na tabela 8, que mostra o efeito da variação dos parâmetros na variável resposta teor de ferro no concentrado. A variável que mais impactou a variável resposta teor de ferro no concentrado foi o percentual de sólidos na alimentação, porém, para análise da seletividade, não houve grande diferença de significância entre as variáveis, indicando que, num planejamento fatorial para avaliação de uma etapa *cleaner*, teria que combinar as 6 variáveis, gerando um número muito grande de ensaios.

4. CONCLUSÕES

O teste mostrou a importância, principalmente do campo e do percentual de sólidos, na recuperação e no teor de concentrado; mostrou também que a pulsação impacta positivamente no resultado, conforme o que é defendido pelo fabricante e precisava ser comprovado.

Os resultados subsidiam um planejamento fatorial e demonstram o que o equipamento fornece de melhoria, principalmente que os campos mais altos darão melhores resultados de recuperação para objetivo de avaliações *rougher*, deixando sabido que a pulsação e o percentual de sólidos melhora a seletividade direcionamento dos trabalhos para o planejamento fatorial da etapa *cleaner*.

5. REFERÊNCIAS

NETO, B. B., Scarminio, S. I., Bruns, R. E. *Como fazer experimentos*. 3ª Ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2007.

BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Agosto 2005. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/lincolngusmao/arquivos/Planejamento%20Experimental.pdf>. Acesso em: 10 dez 2010.

CARVALHO, M. Marque. M., Santos A. Goossens M. Silva C. Uso de ferramenta estatísticas para desenvolvimento de teste padrão de concentração magnética. In: Anais do 11º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Belo Horizonte: ABM, p. 2010.

CIEŚLA, A. Application of superconducting magnets to magnetic separation: some selected aspects. *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 3, pp. 219-240. 1992.

DANIELS, E. J. 9.1 – Industrial Application for HTSCs. In: VOLSKY, A. M. *et alii* (ed.). *Applied Superconductivity*. Park Ridge: Noyes Data, p. 121-128, 1989.

DAHE, X. W. The latest application of SLon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator. *Minerals Engineering*, n 16. Amsterdam: Elsevier, p. 563–565 , 2003.

HEARN, S. B. & DOBBINS, M. N. SLon magnetic separator: A new approach for recovering and concentrating iron ore fines. In: *Montreal Energy & Mines*, Montreal, April 29- May 2, 2000. Disponível em: <http://www.outotec.com/36175.epibrw>. Acesso 01.12.2010.

LUZ, J. A. M. *Parametrização de Separação Magnética de Alto Gradiente (Chamada: Produtividade em Pesquisa 2010)*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas - UFOP. 2010. 16 p.

MARTINS, Afonso Henriques. Análise estatística de experimentos. Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação de Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

XIONG, D. SLon Magnetic Separator Applied to Upgrading Iron Concentrate. In: *Physical Separation in Science and Engineering*, 2. Amsterdam: Elsevier, 2003. pp 63-69.

ZWICK, S. A. *et alii*. 9.3 – Potencial for magnetic separation of gases from gases. In: VOLSKY, A. M. *et alii* (ed.). *Applied Superconductivity*. Park Ridge: Noyes Data, P. 133-145, 1989.