

# USO DE FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA DESENVOLVIMENTO DE TESTE PADRÃO DE CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA<sup>1</sup>

Marly Carvalho<sup>2</sup>  
Michael Marques<sup>3</sup>  
Adriano Santos<sup>4</sup>  
Marcos Goossens<sup>5</sup>  
Camilo Silva<sup>6</sup>

## Resumo

O minério proveniente da região de Copiapó, Chile, apresenta alta susceptibilidade magnética, justificando a utilização de separação magnética. Testes de concentração no Tubo Davis são capazes de indicar a recuperação e o produto a ser gerado com separação magnética de baixa intensidade. O objetivo desse trabalho foi ajustar as variáveis envolvidas e determinar a melhor combinação para o teste padrão a ser desenvolvido com amostras de sondagem. O planejamento estatístico foi feito através de Plackett Burmann, que selecionou as variáveis mais significativas. A partir dos resultados obtidos, foi feito um planejamento fatorial, onde tais variáveis foram analisadas em maior profundidade. As análises estatísticas foram feitas baseadas na recuperação de Fe e teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado. O t calculado mostrou que o campo magnético é significativo para o aumento na recuperação de Fe.

**Palavras-chave:** Planejamento estatístico; separação magnética.

## THE USE OF STATISTICAL TOOLS FOR DEVELOPING A STANDARD TEST OF MAGNETIC CONCENTRATION

### Abstract

The ore from Copiapó region, Chile, has high magnetic susceptibility, justifying the use of magnetic separation. Tests of concentration in tube Davis are able to indicate the recovery and the possible low intensity magnetic separation product. The objective of this study was to adjust the variables involved and to determine the best match for the standard test to be developed in drill samples. The statistical design was done using Plackett Burmann, which selected the most important variables. A factorial design was also made, using the variables selected in Plackett Burmann. Statistical analysis were made, based on Fe in recovery and on %SiO<sub>2</sub> in the concentrate. The t calculated showed that the magnetic field is significant for Fe recovery.

**Key words:** Statistical design; Magnetic separation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Eng<sup>a</sup> de Minas, MMX Mineração e Metálicos S/A.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Metalurgista, MMX Mineração e Metálicos S/A.

<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> de Minas, M.Sc, MMX Mineração e Metálicos S/A.

<sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> de Minas, MMX Mineração e Metálicos S/A.

<sup>6</sup> Eng<sup>o</sup> de Minas, D.Sc, MMX Mineração e Metálicos S/A.

## 1 INTRODUÇÃO

O planejamento experimental representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos. Os principais objetivos são determinar quais variáveis são mais influentes e atribuir valores a elas, de modo a otimizar os resultados minimizando a variabilidade dos mesmos. Segundo Button<sup>(1)</sup> dentre os benefícios da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental destacam-se:

- redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação; estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- determinação da confiabilidade dos resultados; realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- representação do processo estudado através de expressões matemáticas; e
- elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

A utilização de ferramentas estatísticas em estudos para concentração de minerais é freqüente. Carvalho et al.,<sup>(2)</sup> através de planejamento fatorial de testes de flotação com minério wilemítico, estudou a aplicação de novos sistemas de reagentes e avaliou a interação entre eles. Santos, Masson e Lemos<sup>(3)</sup> através do Plackett-Burman, estudou como variáveis a porcentagem de sólidos, concentração de ácido sulfúrico, temperatura e tempo de reação no estudo de obtenção de níquel por lixiviação.

O objetivo desse estudo foi, através de ferramentas estatísticas, ajustar as variáveis envolvidas no teste de separação magnética utilizando o Tubo Davis. A partir dessas variáveis, determinar qual a melhor combinação para o teste padrão de separação magnética a ser desenvolvido nas amostras de minério de ferro provenientes das áreas da MMX Minera Del Chile.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra utilizada nesse estudo é proveniente do Chile, composta por magnetita, hematita, silicatos de ferro, quartzo, mica, calcita e dolomita. Foi utilizada uma amostra representativa já adequada à granulometria de liberação dos minerais de Fe (5% < 200#).

A primeira ferramenta estatística utilizada foi o planejamento estatístico de Plackett Burmann. O objetivo desse método é indicar qual a importância das variáveis envolvidas na separação magnética no Tubo Davis, filtrando as mais relevantes. A partir dessa informação foi feito um planejamento fatorial, onde tais variáveis foram estudadas em profundidade e com esse resultado buscou-se a melhor condição para o teste padrão.

### 3.1 Planejamento Estatístico de Plackett Burmann

A Tabela 1 mostra as variáveis analisadas nessa etapa. Cada variável foi testada em dois níveis, máximo (+) e mínimo (-). Variáveis fictícias foram inseridas, segundo metodologia de Plackett Burman, para avaliar a variabilidade dos testes.

**Tabela 1:** Variáveis e níveis

Variáveis	Níveis	
	-	+
1-Tempo (seg)	5	10
2- Inclinação (°)	40	50
3- Vazão de água	1	1,5
4- Fictícia	0	0
5- Massa (g)	20	35
6- Agitação	Média	alta
7- Fictícia	0	0

Para análise de 7 variáveis, o planejamento estatístico de Plackett Burmann sugere a realização de 8 testes e 8 réplicas, conforme mostra a Tabela 2. Em cada teste ocorre uma combinação específica entre os níveis testados em cada variável.

**Tabela 2:** Planejamento dos testes

Teste	Variáveis						
	1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	-	+	-	-
2	-	+	+	+	-	+	-
3	-	-	+	+	+	-	+
4	+	-	-	+	+	+	-
5	-	+	-	-	+	+	+
6	+	-	+	-	-	+	+
7	+	+	-	+	-	-	+
8	-	-	-	-	-	-	-

Os testes foram feitos em ordem aleatória no laboratório do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG e o equipamento utilizado foi o Separador Magnético Tubo Davis Dings – Imã Permanente 800 Gauss.

### 3.2 Planejamento Fatorial

A partir do resultado obtido no Plackett Burmann, foi feito um planejamento fatorial, cujas variáveis e níveis estão apresentados na Tabela 3:

**Tabela 3:** Variáveis e níveis

Variáveis	Níveis	
	-	+
A - Campo (Gauss)	600	1000
B - Vazão de água (l/min)	1	2
C - Agitação (htz)	50	70

O planejamento fatorial, para as 3 variáveis selecionadas no Plackett Burmann, indica a realização de 8 testes conforme a Tabela 4:

**Tabela 4:** Planejamento dos testes

Teste	Variáveis		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
5	+	+	-
4	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Os testes do planejamento fatorial foram feitos aleatoriamente no separador eletromagnético tipo Tubo Davis da Inbras Eriez, com campo variável de até 4.400 Gauss. A massa utilizada em cada teste é de aproximadamente 20 g e o tempo foi de 10 minutos. Foi feita réplica de cada teste.

### 3.3 Validação e Ajustes

A partir do resultado indicado na análise estatística, foram feitos ajustes para validação e fechamento do teste padrão a ser utilizado.

Uma varredura de intensidade de campo magnético foi feita a fim de fixar o campo a ser usado no teste padrão. Nessa etapa, as variáveis de teste foram fixadas conforme o estudo estatístico e o campo foi variado em: 2.000 Gauss, 2.500 Gauss, 3.000 Gauss, 3.500 Gauss e 4.000 Gauss.

## 4 RESULTADOS

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos testes do planejamento estatístico de Plackett Burmann e planejamento fatorial:

**Tabela 5:** Resultados Testes

Teste	Fluxo	Plackett Burmann				Planejamento Fatorial			
		Recuperação Mássica	Rec. Fe	Fe (%)	SiO2 (%)	Recuperação Mássica	Rec. Fe	Fe (%)	SiO2 (%)
1	Concentrado	55%	74%	68,99	1,66	38%	53%	69,50	1,58
1	Rejeito	45%		29,58	31,78	62%		39,00	25,00
2	Concentrado	59%	80%	68,05	2,34	51%	71%	69,90	1,38
2	Rejeito	41%		25,18	35,15	49%		29,90	31,60
3	Concentrado	57%	76%	67,76	2,83	21%	30%	69,70	1,32
3	Rejeito	43%		28,21	32,85	79%		44,80	20,00
4	Concentrado	61%	83%	66,74	3,41	30%	41%	69,70	1,37
4	Rejeito	39%		20,79	38,54	70%		42,90	21,90
5	Concentrado	63%	84%	67,03	3,10	52%	72%	69,90	1,45
5	Rejeito	37%		22,17	37,45	48%		29,30	32,50
6	Concentrado	63%	83%	65,84	3,64	20%	27%	70,30	1,30
6	Rejeito	37%		23,39	36,94	80%		45,80	19,20
7	Concentrado	62%	82%	65,80	3,12	50%	70%	70,30	1,37
7	Rejeito	38%		23,46	36,10	50%		30,70	31,50
8	Concentrado	80%	93%	58,57	8,60	54%	75%	69,30	1,54
8	Rejeito	20%		16,28	41,50	46%		27,60	34,10

#### 4.1 Resultado dos Ajustes e Validação do Teste Padrão

Baseado na análise estatística e no alto teor de Fe no rejeito foi feita varredura de intensidade de campo magnético, buscando manter a qualidade do concentrado, maiores recuperações e conseqüentemente, menor teor de Fe no rejeito.

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos na varredura de campo:

**Tabela 6.** Varredura de Intensidade de Campo Magnético

Fluxo	Campo (Gauss)	Recup. Mássica Etapa (%)	Fe (%)	SiO2 (%)
Concentrado	2000	55	68,70	1,49
Rejeito	2000	45	26,00	35,50
Concentrado	2500	55	69,00	1,44
Rejeito	2500	45	25,70	35,60
Concentrado	3000	56	68,60	1,42
Rejeito	3000	44	25,20	35,90
Concentrado	3500	55	68,80	1,37
Rejeito	3500	45	25,70	35,60
Concentrado	4000	56	69,60	1,35
Rejeito	4000	44	25,60	35,90

A Tabela 6 mostra que o aumento da intensidade do campo magnético não proporcionou ganho em recuperação. O Fe remanescente no rejeito é originado de minerais de baixa susceptibilidade magnética que não são recuperados no Tubo Davis, uma vez que o campo máximo obtido nesse equipamento é de 4.400 Gauss.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 Planejamento Estatístico de Plackett Burmann

A recuperação do Fe foi à variável resposta analisada para esse planejamento. Efeito da variável - EA:

O efeito da variável é dado por:<sup>(4)</sup>

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

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 Tabela 7 apresenta o efeito de cada variável.

**Tabela 7:** Resultados do EA

	<b>Variáveis</b>	<b><math>E_A</math></b>
<b>1</b>	Tempo (seg)	0,02621
<b>2</b>	Inclinação (°)	0,03978
<b>3</b>	Vazão de água (l/min)	0,07408
<b>5</b>	Massa (g)	0,05071
<b>6</b>	Agitação	0,03841

Variância -  $V_{ef}$ :

A variância entre os testes foi analisada através das variáveis fictícias e é calculada pela seguinte fórmula:<sup>(4)</sup>

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

Onde:  $V_{ef}$  = Variância

$E_f$  = efeito da variável

$m$  = número de variáveis fictícias

Para esse estudo a variância foi de 0,000635.

Erro padrão dos efeitos – EP e significância estatística dos efeitos T-Student:<sup>(4)</sup>

$$E.P_{ef} = \sqrt{V_{ef}} \quad \text{Onde: EP = Erro Padrão}$$

Vef = Variância

Para esse estudo a EP foi igual a 0,025208.

A significância estatística dos efeitos é calculada por<sup>(4)</sup>:

$$t_A = \frac{E_A}{E.P_{ef}} \quad \text{Onde } t_A = \text{T-Student}$$

$E_A$  = Efeito da Variável  
EP = Erro Padrão

A Tabela 8 mostra os valores de  $t_A$  encontrados para cada variável:

**Tabela 8:** Resultados do  $t_A$

<b>Variáveis</b>	<b><math>t_A</math></b>
1-Tempo (seg)	1,04
2- Inclinação (°)	1,58
3- Vazão de água	2,94
4- Fictícia	1,31
5- Massa (g)	2,01
6- Agitação	1,52
7- Fictícia	0,54

Quanto maior for o valor de  $t_A$  maior é a importância da variável. As variáveis mais importantes foram vazão da água e massa, e em menor importância inclinação do tubo, agitação e tempo do teste.

## 5.2 Análise Estatística do Planejamento Fatorial

A partir dos resultados obtidos, foi feita análise estatística no software Minitab baseado na recuperação de Fe e no teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado.

A Figura 1 mostra o efeito das variáveis e de suas interações nos resultados obtidos:

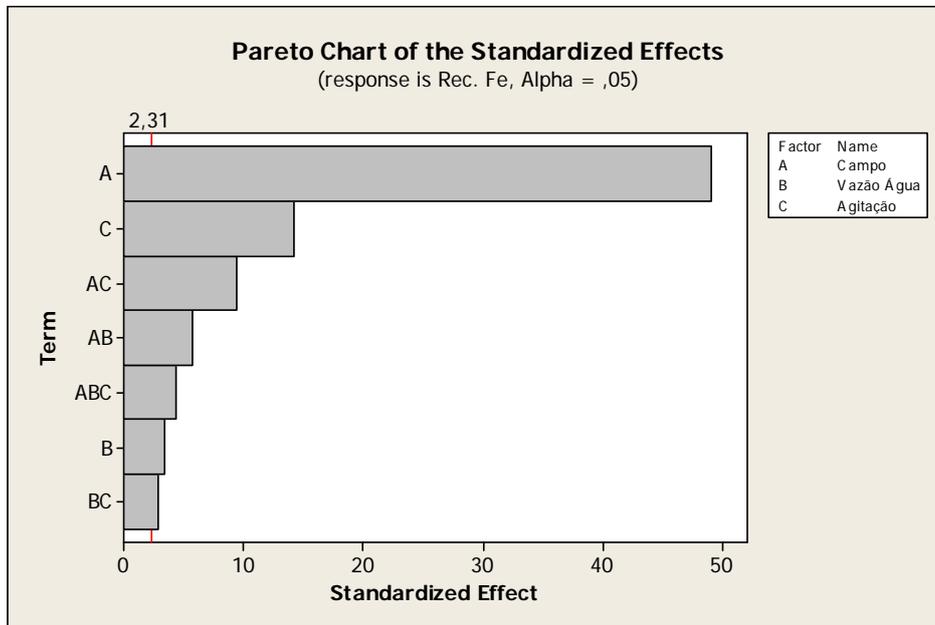


Figura 1: Gráfico de Pareto baseado na Recuperação de Fe.

O gráfico de Pareto (Figura 1) mostra que o campo magnético é a variável mais significativa para a variação da recuperação de Fe. Em menor proporção, a agitação também influencia esse resultado. A interação entre as variáveis é pouco significativa.

A Figura 2, indica a melhor combinação das variáveis analisadas para se obter maior recuperação de Fe:

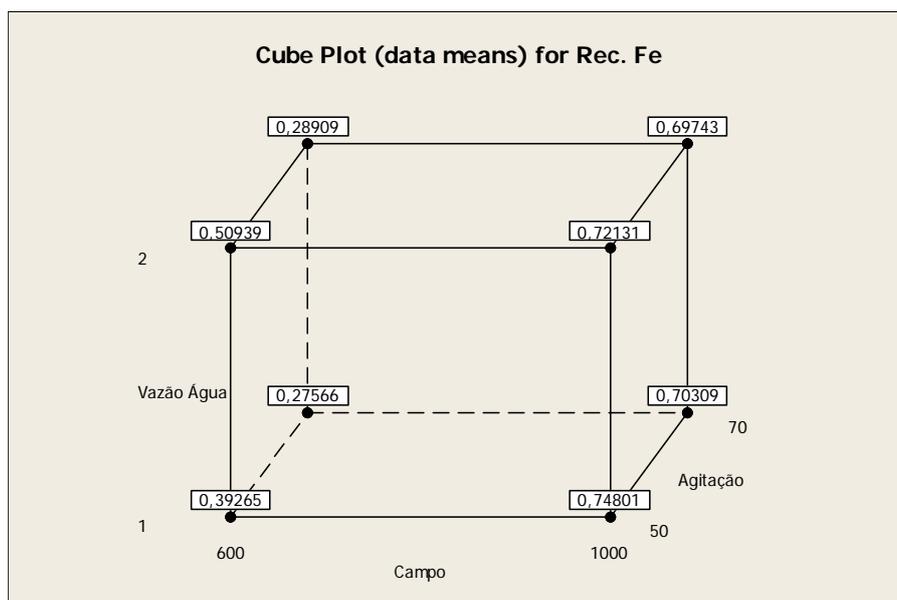


Figura 2: Gráfico do Cubo baseado na recuperação de Fe.

Cada aresta do cubo (Figura 2) representa a média da recuperação obtida nos testes e réplicas. O gráfico mostra que a maior recuperação de Fe (ponto 0,74801-equivalente a 75%) foi a melhor condição testada: campo de 1000 Gauss, agitação de 50 hrtz e vazão de água de 1l/min.

A Figura 3 mostra a significância das variáveis, nos níveis estudados, para a influência na SiO<sub>2</sub> no concentrado:

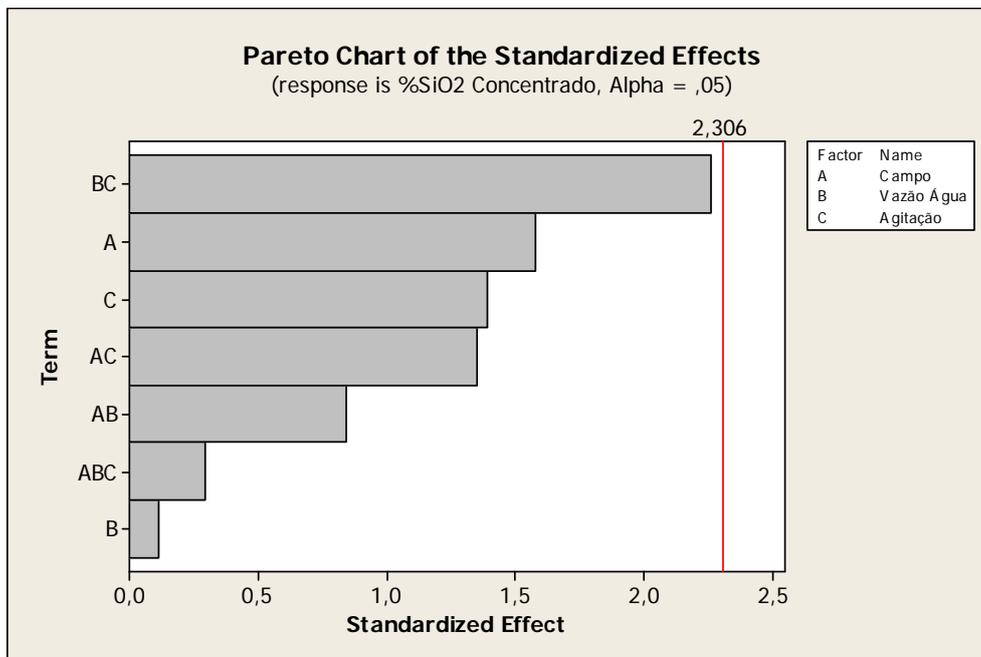


Figura 3: Gráfico de Pareto.

As variações, nas proporções feitas, não foram significativas na análise de SiO<sub>2</sub> no concentrado. Nenhum efeito ultrapassa a linha equivalente a 2,306.

## 6 CONCLUSÃO

No modelo estatístico de Plackett Burmann foram estudadas as seguintes variáveis: tempo, inclinação do tubo, vazão de água, massa e agitação. O estudo mostrou que as variáveis mais importantes envolvidas são: vazão da água e massa e em menor importância inclinação do tubo, agitação e tempo do teste.

O planejamento fatorial indicou, dentre as variáveis estudadas, o campo magnético como sendo a variável mais significativa. O aumento da intensidade do campo magnético favorece o aumento na recuperação de Fe. Essa conclusão só é significativa, quando a variação é feita de 600 Gauss até 1.000 Gauss. Acima dessa intensidade até 4.000 Gauss não há ganho em recuperação, ou em qualidade dos produtos gerados.

A análise da agitação indicou que, níveis mais baixos de agitação do equipamento sugerem um aumento na recuperação de Fe. A vazão de água não foi significativa.

A partir das análises estatísticas, foram definidas as condições de operação do tubo Davis utilizadas no teste padrão:

- Peso da amostra: 20 g;
- Granulometria: 5% > 200#;
- Inclinação do Tubo: 45° em relação ao plano horizontal;



- Velocidade de agitação do tubo 50 Hz;
- Vazão de água 1 l/min;
- Tempo de teste: 10 min; e
- Intensidade do campo magnético: 1.000 Gauss.

O ajuste das variáveis conforme indicado no planejamento fatorial, reduziu o teor de Fe no rejeito de 30% para aproximadamente 26%, independente do campo magnético utilizado.

## REFERÊNCIAS

- 1 BUTTON, Sérgio Tonini. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados, agosto 2005. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/lincolnusmao/arquivos/Planejamento%20Experimental.pdf> Acesso em: 23 jun. 2010.
- 2 CARVALHO, Marly Ávila ; SILVA, Tiago Alvarenga Vitorino da ; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. . Optimization of willemite flotation. In: XII Balkan Mineral Processing Congress 2007, 2007, Delphi. XII BMPC 2007. Athens : National Technical University of Athens, 2007. v. 1. p. 195-200.
- 3 SANTOS, Rômulo Boechat, MASSON, Ivan Ondino de Carvalho, LEMOS, Flávio de Almeida. Estudo de Obtenção de Níquel Empregando Lixiviação Sob Pressão, 2006. Disponível em [http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie\\_anais\\_XIV\\_jiv\\_2006/Romulo%20Boechat.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XIV_jiv_2006/Romulo%20Boechat.pdf) Acesso em 23 jun. 2010-06-23.
- 4 CASSA, José Clodoaldo Silva , Seleção de Variáveis de Processo e Programação de experimentos pela abordagem Estatística de Plackett – Burman, 1<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Química de 27 a 29 de julho de 1976 – São Paulo, Brasil.