

## MODELO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA FILTRAGEM DE PELLET FEED

SILVA, B.B.<sup>1</sup>, VARGAS, F.G.R.G.C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engenheiro Metalurgista, VALE. benito.silva@vale.com

<sup>2</sup>Engenheira de Minas, Votorantim Metais. flavia.vargas@vmetais.com.br

### RESUMO

A separação sólido-líquido por filtragem do *pellet feed* é considerada uma etapa crítica no processo de pelletização. A não adequação da umidade às especificações afeta a qualidade das pelotas produzidas e aumenta o custo de produção. Visando investigar o comportamento das variáveis manipuláveis da filtragem estudou-se o histórico de superfície específica (medida pelo método de *blaine*), densidade de alimentação da filtragem, velocidade de rotação dos filtros, perda por calcinação e pressão de vácuo. A partir da aplicação da metodologia de regressão linear múltipla concluiu-se que densidade, velocidade de rotação e superfície específica possuem influência significativa no processo, sendo essa última mais impactante.

**PALAVRAS-CHAVE:** filtragem; pelletização; umidade; pellet feed.

### ABSTRACT

Solid-liquid separation of pellet feed is considered a critical step in pelletizing process. If moisture content is out of specifications, loss of pellets quality and increase of production costs are unavoidable. In order to investigate the behavior of manipulable variables and determine the ones which have relevant influence, statistical analysis on historic data of specific surface (Blaine), pulp specific gravity, disc rotation speed, loss due calcination and operational vacuum pressure was performed. Through the application of multiple linear regression method, it could be concluded that specific gravity, rotational disks speed and specific surface are significant to the process, having the latter the most remarkable influence.

**KEYWORDS:** filtering; pelletizing; moisture; pellet feed.

## 1. INTRODUÇÃO

A vasta gama de processos de beneficiamento de minério de ferro se resume a uma estreita carteira de produtos distintos granulometricamente:

- a. Minério granulado (*lump ore*) 6,3 a 31,7 mm;
- b. *Sinter feed* 0,15 a 6,3 mm;
- c. *Pellet feed* 100% < 100# ou 0,150 mm.

A pelotização é o processo de aglomeração desta última fração que através de tratamento térmico de sinterização beneficia o *pellet feed* e o transforma em pelotas queimadas e peneiradas entre 8,0 e 18,0 mm conferindo-lhes resistência mecânica suficiente ao transporte transoceânico e à posterior alimentação e redução a ferro primário (gusa ou esponja) em alto fornos e/ou reatores de redução direta.

Para a pelotização, a filtragem é normalmente realizada de forma contínua, a vácuo e em filtros rotativos de disco. Essa operação é considerada crítica no processo de aglomeração, pois o teor de umidade do *filter cake* produzido tem forte influência na cinética de formação e qualidade das pelotas verdes. O excesso de umidade durante o pelotamento favorece o aumento do diâmetro médio das pelotas, compromete sua resistência mecânica por aumento da espessura dos capilares e arrasta finos aderidos à superfície das pelotas verdes para o interior do forno. Este último fato prejudica radicalmente a permeabilidade da camada, aumenta o consumo específico de gás natural/óleo combustível e pode culminar na formação de cachos (colagem de pelotas).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados coletados datam do período de 01/01/2011 01:00 a 01/04/2012 01:00 e foram retirados do PIMS (*Plant Information Management System*) que é um sistema de armazenamento de informações relevantes de um processo automatizado na forma de banco de dados, disponíveis através de telas gráficas e relatórios.

A usina estudada utiliza o sistema PIMS *Infoplus.21*, um servidor de coleta e provisão de dados. A coleta, cálculo de médias e totalização dos dados foram realizadas através da interface do *Infoplus.21* com o Excel 2003. Os dados referentes a análises laboratoriais também puderam ser tratados da mesma forma, pois, a gestão de resultados é feita pelo sistema *Nautilus* que exporta os resultados para o PIMS. O tratamento estatístico das informações obtidas foi desenvolvido no *Minitab14*.

Embasados pela experiência operacional e pela bibliografia disponível foram selecionados e analisados os históricos das seguintes variáveis manipuláveis da filtragem que poderiam impactar significativamente na umidade: superfície específica do *filter cake*, densidade de alimentação da filtragem, velocidade de rotação dos filtros, pressão de vácuo e perda por calcinação (PPC).

A Tabela I apresenta o resumo dos dados históricos tratados estatisticamente:

**Tabela I. Resumo dos dados históricos tratados estatisticamente.**

Umidade (%)	Blaine (m <sup>2</sup> /Kg)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Média Vel. de Rotação (rpm)	PPC (%)	Pressão de Vácuo (mmHg)
10,10	176,8	2080	0,29	4,36	458
10,01	174,9	2030	0,32	4,11	490
10,09	178,9	2000	0,30	4,26	514
9,98	171,2	2050	0,30	4,27	504
9,93	174,9	2090	0,31	4,25	508
9,95	176,4	2130	0,30	4,24	502
9,92	180,6	2090	0,30	4,40	494
10,05	180,5	2130	0,29	4,38	473
10,18	182,9	2040	0,29	4,37	517
10,36	180,6	2000	0,26	4,33	484
10,21	175,7	2030	0,25	4,14	460
10,23	176,7	2030	0,25	4,23	483
10,33	184,5	2070	0,23	4,90	472
10,40	185,9	2070	0,23	4,55	476
10,28	185,5	2020	0,23	4,61	483
10,35	179,7	2050	0,22	4,50	485

Ao aplicar o método de regressão linear múltipla a fim de obter um modelo conforme equação (1) busca-se correlacionar as variáveis manipuláveis significativas que explicam a variação na resposta.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

Através da tabela *T-Student*, calcula-se o p-valor para cada um dos coeficientes  $\beta$  e compara-os com o nível de significância,  $\alpha$ , definido. As variáveis com p-valor superior ao nível de significância escolhido são excluídas do modelo, pois não contribuem significativamente para explicar o comportamento e a variância da resposta. Segundo Valadão (2003) “A modelagem matemático/estatística surge como outra alternativa à teoria clássica no sentido de quantificar a ação de variáveis que influenciam a filtragem.”

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira regressão obtida para umidade utilizou todas as variáveis de controle levantadas: superfície específica (*blaine*), densidade de alimentação da filtragem, velocidade de rotação dos filtros, pressão de vácuo e PPC.

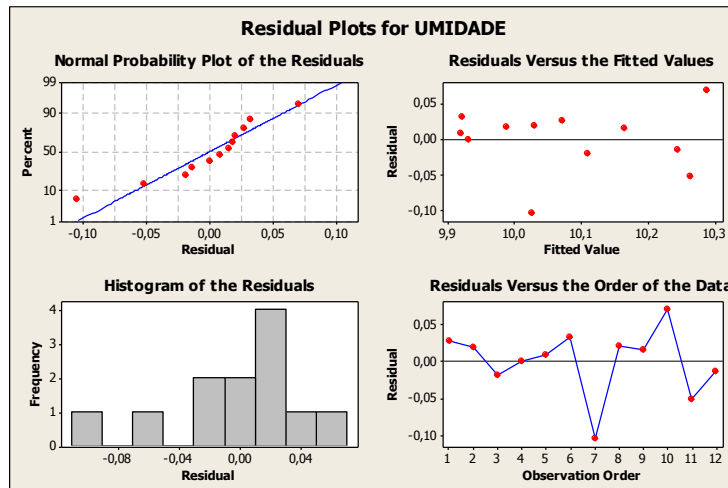


Figura 1. Disposição dos resíduos do modelo 1.

Tabela II. Resposta do modelo 1.

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,65300	1,4080	8,280000	0,000
Blaine	0,0172	0,0080	2,240000	0,067
Densidade	$-1,404 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$	-2,770000	0,032
Rotação	-3,18200	1,0890	1,089000	0,027
PPC	-0,07050	0,2900	0,290000	0,816
Vácuo	-0,00104	0,0012	0,001216	0,424

$$S = 0,0603054 \quad R\text{-Sq} = 90,2\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 82,0\%$$

A equação de regressão fornecida foi:

$$\text{Umidade} = 11,7 + 0,0172 \text{ Blaine} - 1,40 \times 10^{-3} \text{ Densidade} - 3,18 \text{ Rotação} - 0,071 \text{ PPC} - 0,00104 \text{ Vácuo} \quad (2)$$

O modelo obtido apresenta ótima aderência aos dados explicando em 90,2% a variação dos dados. Entretanto, a variável PPC apresentou p-valor bastante superior a 0,10 (nível de significância previamente definido), ou seja, não é estatisticamente significativa para explicar a variância assistida no processo, devendo ser excluída do modelo.

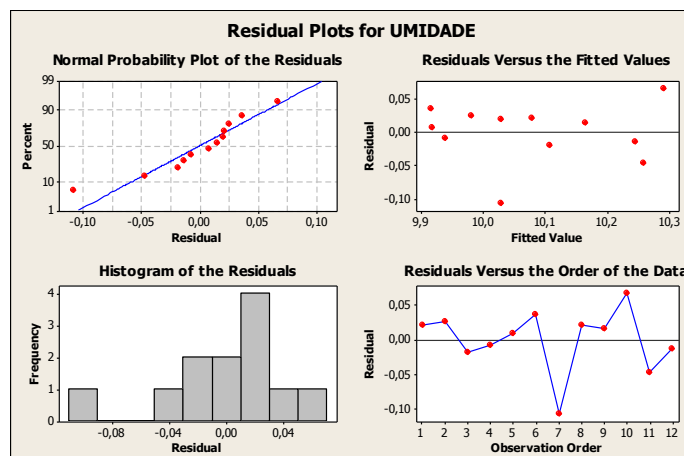


Figura 2. Disposição dos resíduos do modelo 2.

**Tabela III. Resposta do modelo 2.**

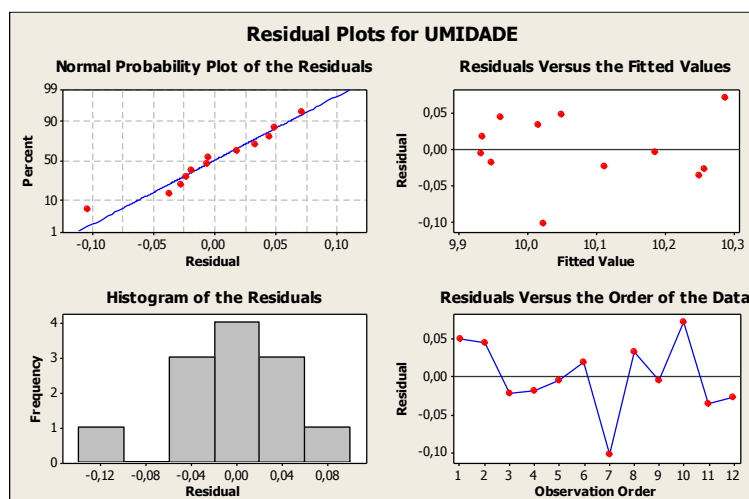
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,6810	1,3060	8,95	0,000
Blaine	0,0159	0,0050	2,99	0,020
Densidade	$-1,45 \times 10^{-3}$	$0,431 \times 10^{-3}$	-3,37	0,012
Rotação	-3,1980	1,0110	3,16	0,016
Vácuo	-0,0010	0,0011	-0,93	0,385

A equação de regressão então fornecida foi:

$$\text{Umidade} = 11,7 + 0,0159 \text{ Blaine} - 1,45 \times 10^{-3} \text{ Densidade} - 3,20 \text{ Rotação} - 0,00105 \text{ Vácuo} \quad (3)$$

O novo modelo obtido demonstra como realmente o PPC não contribuía para a exatidão obtida. Ao retirá-lo, a variância da umidade regrediu apenas 0,1%. O R ajustado também comprova que a importância desta variável era nula e até reduzia a contribuição dos coeficientes  $\beta$  para o modelo (aumentou de 82% para 84,4% neste segundo modelo).

Novamente a avaliação isolada de cada variável de controle é realizada. Pela Tabela III temos que a pressão de vácuo acusou p-valor bem acima do nível de significância. É fundamental comentar que a exclusão de variáveis passa não apenas por critérios estatísticos mas o foco interpretativo destas e o conhecimento técnico sobre os papéis desempenhados por elas no processo é insubstituível e necessário. O dimensionamento das bombas de vácuo, equipamentos mais importantes na implantação de uma filtragem, leva em consideração as perdas de carga do sistema imposta por tecidos, setores, tubulações, conexões, torta a ser filtrada e a altitude em que estão localizadas. Apesar da sua importância, por que ela não foi significativamente influente na umidade? Ao analisar o conjunto de dados da Tabela I, nota-se que a faixa de variação da pressão de vácuo foi muito estreita e que para estes níveis (entre -500 e -525mmHg) não foi significativamente impactante para a variável resposta. Não podemos extrapolar o modelo empírico para faixas de operação que não praticadas como, por exemplo, uma utópica idéia de reduzir a pressão de vácuo para mínimos -100mmHg ou assumir pressões de vácuo muito baixas que não podem ser realizadas pela capacidade do sistema. Nestes casos, a torta não seria secada ou sequer formada ou seria produzida fora dos limites exigidos pelo pelotamento. Estes modelos obtidos são inválidos fora de seu domínio. Mas caso a filtragem opere entre os limites de pressões susoditos, o modelo é aplicável.



**Figura 3. Disposição dos resíduos do modelo 3.**

**Tabela IV. Resposta do modelo 3.**

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,208000	1,1910	9,41	0,000
Blaine	0,014920	0,0050	2,89	0,020
Densidade	-1,303x10 <sup>-3</sup>	0,396x10 <sup>-3</sup>	-3,29	0,011
Rotação	-3,799500	0,7692	-4,94	0,001

$$S = 0,0556096 \quad R\text{-Sq} = 88,9\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 84,7\%$$

$$\text{Umidade} = 11,2 + 0,0149 \text{ Blaine} - 1,30 \times 10^{-3} \text{ Densidade} - 3,80 \text{ Rotação} \quad (4)$$

Após a exclusão da pressão de vácuo, temos o modelo linear múltiplo definido pela equação (4). Na Tabela IV, percebemos que todas as variáveis de controle apresentam p-valor abaixo do nível de significância definido. Este modelo explica 88,9% das variações observadas pela variável resposta. E, novamente, o R ajustado avança para 84,7% indicando que a decisão pela retirada da pressão de vácuo foi corretamente executada.

De posse do modelo, passa-se a análise dos resíduos e probabilidade de distribuições a fim de verificar a possibilidade de refino da solução encontrada. Pelo primeiro gráfico da Figura 3, conclui-se que o modelo linear é suficiente para explicar as variações da umidade. Os resíduos seguem uma distribuição normal não sendo necessária(s) inclusão(ões) de potências de maior grau para ajuste. O segundo gráfico confirma o primeiro e indica que o erro médio quadrado se mantém constante ao longo de toda faixa do modelo. Pelo último gráfico, conclui-se que não houve interferência de ruídos ao longo do tempo, pois os pontos estão aleatoriamente distribuídos e que não há *outliers* durante o período.

A equação (4) gerada indica que *blaine* se correlaciona diretamente com a umidade do *filter cake* e que variações de densidade e rotação provocam variações de sentido oposto. Isto é, para valores de *blaine* mais elevados serão produzidas tortas mais úmidas, fato também observado na literatura. Segundo Valadão e Perez (1996) “a superfície específica é uma variável extremamente importante”. Ao aumentar a área superficial aumenta-se a perda de carga da torta dificultando a extração de água da torta nas camadas mais externas por percolação entre os grãos minerais até a tubulação de vácuo. Este é o mesmo padrão encontrado para outros processos onde a percolação capilar é de suma importância tal como no próprio processo de pelotamento.

A relação de densidade e umidade segue comportamento inverso. A operação com valores de densidade mais elevados na alimentação da filtragem favorece a formação de uma torta mais seca, além de favorecer a produtividade (TUF). Esse fato está em consonância com a literatura. Segundo Chaves (2010) “é de toda conveniência adensar ao máximo a alimentação da filtragem. O limite prático é a possibilidade física de bombeamento da polpa adensada”. Esse adensamento é mais impactante na TUF do que nos resultados de umidade entretanto, seu impacto é significativo sendo explicado pela própria definição de densidade. Sendo essa uma relação de massa/volume, quanto menores seus valores maior a participação da fase líquida na suspensão. Considerando que a capacidade de separação da filtragem é a mesma, filtrar uma polpa onde o grau de saturação com a fase líquida é maior conduz a formação de uma torta com teor de umidade final maior se comparado à filtragem de uma polpa mais adensada, pois o percentual de umidade retido é o mesmo observado na filtração onde predomina a fase sólida.

Pelo modelo obtido, velocidades de rotação mais baixas geram tortas mais úmidas. A velocidade de rotação dos filtros define o tempo destinado à formação e secagem da torta. O tempo de formação, juntamente com a porcentagem de sólidos na suspensão, é responsável por uma torta mais ou menos

espessa. Neste caso, a competição entre torta mais espessa e maior tempo de secagem é vencida pela primeira. A perda de carga é muito maior para filtragem de *pellet feed* e a secagem bastante árdua mesmo que tenha mais tempo. Talvez, para filtragem de *feeds* mais grossos como *sinter feed* a relação possa ser contrária.

#### 4. CONCLUSÕES

A análise estatística do histórico apontou que alterações nos valores de superfície específica, densidade e velocidade de rotação demonstram ser significativas no processo de filtragem de *pellet feed*.

No que concerne a superfície específica e velocidade de rotação objetivando a faixa de especificação da umidade, temos que as condições ideais são obtidas quando se aplicam valores de rotação mais baixos para filtragem de minérios cuja superfície específica é menor. Fica claro que a velocidade de rotação dos filtros precisa ser ajustada de acordo com o *blaine* do material, já que esta é a variável sob a qual se tem menor nível de controle, pois é fortemente correlacionado com o WI do minério. É muito comum observar grandes alterações nos valores de superfície específica quando muda-se a pilha de minério de alimentação ou pela própria medida de análise que apresenta erro significativo.

Recomenda-se que no processo de filtragem seja praticado operacionalmente a maior densidade possível a fim de aumentar a produtividade e contribuir para a secagem mais eficiente da polpa e redução de energia específica desta etapa. Quanto ao *blaine*, uma análise conjunta deve ser elaborada levando em consideração aspectos de consumo específico dos moinhos, nível de tanques, modelos de previsibilidade de resultados e limites para atendimento das necessidades do pelotamento. A rotação do filtro deve ser a variável de controle mais manipulada para atingir o ponto ótimo de umidade.

#### 5. REFERÊNCIAS

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: desaguamento, espessamento e filtragem. 3 ed. São Paulo: Signus Editora, 2010.

VALADÃO G. E. S.; PERES, A. E. C. A “superfície específica” como variável em modelos de filtragem. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, v.2, p.488-492, Uberlândia, Brasil, 1996.

VALADÃO G. E. S. Minério de Ferro: Processos de obtenção e sua utilização na siderurgia. Curso ABM. Item 6.3 Separação sólido/líquido, p.252-325, Belo Horizonte, 01 a 04 de abril 2003.

