

# **PREVISÃO DE DESEMPENHO DA OPERAÇÃO DE ESCRUBAGEM DE BAUXITA EM TAMBOR DESAGREGADOR**

J. H. B. da Costa<sup>1</sup>, H. Delboni Júnior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Coordenação de Mineração, Departamento de Recursos Naturais, Campus Belém, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, Belém, Pará, 66093-090.  
E-mail: [jaime.costa@ifpa.edu.br](mailto:jaime.costa@ifpa.edu.br)

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 1155. Cidade Universitária. CEP 05508-900. São Paulo-SP  
E-mail: [hdelboni@usp.br](mailto:hdelboni@usp.br)

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi investigar, sob o enfoque da modelagem matemática, a operação de escrubagem da bauxita proveniente da jazida Miltônia 3, da Mina de Bauxita de Paragominas-PA, com vistas a fornecer parâmetros para previsão de seu desempenho e otimização. Para isso, foi realizada uma campanha de experimentos de escrubagem, num tambor desagregador de laboratório, baseada em planejamento fatorial 2<sup>3</sup>. Os parâmetros operacionais avaliados foram: o grau de enchimento, o tempo de residência da polpa e a velocidade de rotação. A variável de resposta selecionada foi a quantidade de finos (partículas menores que 0,037 mm) no produto desagregado, visto que é abaixo desta granulometria que se encontra o argilomineral caulinita, principal portador da sílica reativa, contaminante do minério, a qual deve ser individualizada e separada do mineral de interesse. O programa de experimentos permitiu a análise da influência das variáveis operacionais na desagregação da bauxita. De acordo com os resultados obtidos, o parâmetro operacional que produziu o efeito mais significativo na variável de resposta foi o grau de enchimento. O modelo desenvolvido foi validado através da comparação com os resultados de ensaios de escrubagem em uma unidade piloto. Os valores da quantidade de finos, no produto desagregado, previstos pelo modelo apresentaram uma boa aproximação com os dados experimentais da operação em escala piloto, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de  $\pm 10\%$  de desvio em relação à reta identidade, que fornece a igualdade entre os valores experimentais e os previstos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escrubagem. Modelagem. Bauxita. Tambor Desagregador

## 1. INTRODUÇÃO

Taggart (1945) define a operação unitária de escrubagem de minérios como sendo a desagregação por meio de forças relativamente leves, se comparadas com os esforços usuais em cominuição, porém suficientes para reduzir materiais razoavelmente moles e inconsolidados, tais como argilas, ou para separar grãos unidos entre si por ligações brandas geradas, por exemplo, na cimentação natural ocorrida com certos minérios.

O equipamento utilizado para realizar tal processo é conhecido como *scrubber*. Existem diferentes equipamentos de escrubagem no mercado e o que se utilizou neste trabalho foi o chamado *drum scrubber* ou tambor desagregador. Trata-se de um cilindro, aberto nas extremidades e ligeiramente inclinado em relação à horizontal, que gira em torno de seu próprio eixo, montado sobre rolos. No Brasil, os *drum scrubbers* são utilizados na desagregação e lavagem de bauxitas em várias usinas de beneficiamento, como por exemplo, Mineração Rio do Norte (MRN) em Trombetas, Alcoa em Juruti, as duas localizadas no Estado do Pará e Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) em Miraf e Itamarati- MG (ALVES; REIS, 2008).

Prever o comportamento do minério em instalações de escrubagem para dimensionamento e otimização das mesmas é uma ação que proporcionaria ganhos reais para a indústria mineral. Recentemente, devido à alta competitividade do mercado mineral aliada à crise financeira mundial de 2009, tem havido um forte direcionamento de esforços no sentido de melhorar o desempenho, a produtividade e a confiabilidade de usinas de tratamento de minérios. De acordo com Lima (1997), um recurso poderoso que permite prever desempenho e otimizar as operações unitárias é a modelagem de processo. Sua vantagem é a de economizar tempo e recursos na procura da melhor alternativa de projeto ou da otimização de processos existentes. Atualmente existem e são amplamente utilizados, modelos matemáticos para operações de britagem, moagem, classificação por ciclones, separação gravítica e flotação, entre outros, ainda que estejam em diferentes níveis de desenvolvimento. Para a operação de escrubagem não foram encontrados na literatura trabalhos de modelagem de tal processo, à exceção do trabalho conduzido por Miller (2004) que desenvolveu um modelo para seleção da geometria do *drum scrubber* e de sua potência. O método proposto por Miller é baseado em resultados de ensaios que definem o tempo de residência necessário para promover o grau de desagregação esperado.

É, portanto, altamente relevante e útil o desenvolvimento de modelos desta operação específica para minérios brasileiros de bauxita visando, de forma a prever o desempenho, a otimização de processo e a consequente melhoria da qualidade do produto. O presente trabalho teve por objetivo investigar, sob o enfoque da modelagem matemática, a operação de escrubagem de bauxita, com vistas a fornecer parâmetros para previsão de desempenho e otimização da operação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

A amostra de bauxita foi fornecida pela VALE, para realização dos ensaios, e foi obtida a partir da pilha de homogeneização do circuito industrial da usina de beneficiamento da Mina de Bauxita de Paragominas (MBP). O minério utilizado nos ensaios de escrubagem foi o do platô Miltônia 3. O procedimento para obtenção da amostra primária consistiu da retirada de incrementos desta pilha, formação de uma pilha alongada para homogeneização dos incrementos e retirada da amostra final para trabalho.

## 2.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados nos ensaios de escrubagem foram: um tambor cilíndrico metálico e um acionador com ajuste da velocidade de rotação. As características do tambor metálico são mostradas na Tabela I:

**Tabela I – Características do tambor utilizado nos ensaios de laboratório**

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Comprimento interno (L):	305 mm
Diâmetro interno (D):	305 mm
Relação de aspecto (L/D):	1:1
Altura das aletas de revolvimento:	6 mm
Quantidade de aletas:	4
Volume do cilindro:	22,3 L
Velocidade crítica (Vc):	76,6 rpm

## 2.3 Métodos

Os ensaios de escrubagem, em escala de laboratório, tiveram por objetivo verificar a influência de variáveis operacionais no desempenho do processo. As variáveis estudadas foram as seguintes: grau de enchimento (Ge), tempo de residência da polpa ( $t_r$ ) e velocidade de rotação (Vr). Os dados gerados foram empregados para elaboração de um modelo matemático empírico da operação.

O procedimento experimental consistiu de peneiramento de toda a amostra na peneira de abertura de 76,2 mm, britagem do material retido na malha de 76,2 mm até que todo produto passasse nesta malha, secagem em estufa a 100 °C, homogeneização e quarteamento a fim de se obter alíquotas para realização dos ensaios. A distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios foi determinada através de peneiramento manual a úmido.

O programa de ensaios foi planejado de forma a permitir a análise da influência das variáveis operacionais do processo de escrubagem na desagregação da amostra de bauxita. O método adotado para execução dos ensaios foi baseado num planejamento fatorial  $2^3$  (BARROS NETO et al., 2001). Na Tabela II são apresentadas as variáveis selecionadas para o estudo e seus respectivos níveis de trabalho.

**Tabela II – Variáveis operacionais e seus respectivos níveis**

<b>Variáveis Operacionais</b>	<b>Níveis</b>
Grau de Enchimento – (%)	5 e 10
Tempo de Residência da Polpa – (min)	1 e 3
Velocidade de Rotação – (% Vc)	28,4 e 41,4

Os ensaios foram realizados em duplicata, em ordem aleatória e com concentração de sólidos ( $C_w$ ) da polpa de 50%. As condições operacionais de cada ensaio são apresentadas na

**Tabela III.**

**Tabela III – Condições de realização dos ensaios de escrubagem escala de laboratório**

Ordem	Ensaio	Ge (%)	tr (min)	Vr (%Vc)
3	1	5	1	28,4
4	2	10	1	28,4
2	3	5	3	28,4
1	4	10	3	28,4
6	5	5	1	41,4
8	6	10	1	41,4
7	7	5	3	41,4
5	8	10	3	41,4

O parâmetro de resposta utilizado para avaliar a desagregação ocorrida durante os ensaios foi a porcentagem passante em peneira de abertura 0,037 mm (400 #) do produto desagregado, a qual foi denominada de finos no produto (FP). Neste trabalho, consideraram-se finos, as partículas com tamanhos inferiores a 0,037 mm, pois é abaixo desta granulometria que se encontra o argilomineral caulinita, principal portador da sílica reativa, contaminante do minério, a qual deve ser individualizada e separada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Influência das Variáveis Operacionais na Geração de Finos

O objetivo deste item foi determinar quais dos efeitos das variáveis operacionais dos ensaios foram significativos na desagregação da bauxita. Nesta etapa, considerou-se geração de finos (GF), o acréscimo da quantidade de material, obtido após os ensaios, com granulometria menor que 0,037 mm (400 #). A análise granulométrica da alimentação dos ensaios indicou que 23% das partículas estavam abaixo de 0,037 mm. Os resultados dos ensaios de escrubagem em laboratório, com base no planejamento fatorial  $2^3$ , para estudar o efeito do grau de enchimento, tempo de residência de polpa e velocidade de rotação sobre a geração de finos são mostrados na Tabela IV.

**Tabela IV – Matriz de planejamento**

Ensaio	Fatores			Resposta		Média
	Ge (%)	Tr (min)	Vr (%Vc)	(% passante em 0,037 mm)		
1	5	1	28,4	23,5	28,5	26,0
2	10	1	28,4	33,6	24,0	28,8
3	5	3	28,4	28,1	27,7	27,9
4	10	3	28,4	32,5	29,6	31,1
5	5	1	41,4	28,8	28,1	28,5
6	10	1	41,4	29,1	37,3	33,2
7	5	3	41,4	29,0	30,1	29,6
8	10	3	41,4	31,0	37,2	34,1

Os resultados dos efeitos das variáveis operacionais na resposta da operação de escrubagem de bauxita, em escala de laboratório, são observados na

**Tabela V.**

**Tabela V – Resultados dos efeitos para o planejamento fatorial 2<sup>3</sup> dos ensaios de escrubagem em laboratório**

<b>Média de Finos no Produto:</b>	29,9 ± 0,95
<b>Efeitos principais:</b>	
1 (Grau de Enchimento)	3,81 ± 1,91
2 (Tempo de Residência de Polpa)	1,54 ± 1,91
3 (Velocidade de Rotação)	2,89 ± 1,91
<b>Interação de dois fatores:</b>	
12	0,04 ± 1,91
13	0,84 ± 1,91
23	-0,54 ± 1,91
<b>Interação de três fatores:</b>	
123	-0,14 ± 1,91

Utilizou-se o teste t de *Student*, com 90% de confiança e 8 graus de liberdade, para decidir quais dos efeitos dos fatores são significativos na resposta selecionada, nesse nível de confiança. Aplicando esse critério aos valores da

**Tabela V**, observou-se que, somente o efeito do grau de enchimento é significativo, nesse nível de confiança.

#### 4. MODELAGEM DO PROCESSO

Para definição do modelo, as variáveis operacionais selecionadas foram: o grau de enchimento, por ter apresentado o efeito mais significativo na desagregação da bauxita; e o tempo de residência da polpa, por ser um parâmetro de engenharia utilizado no dimensionamento de equipamentos de escrubagem. Quanto à velocidade de rotação do *scrubber*, esta apresentou importância intermediária entre o grau de enchimento e o tempo de residência da polpa. Entretanto, decidiu-se generalizar o modelo sem explicitar esta variável. O parâmetro quantidade de finos no produto, representado pela porcentagem passante em 0,037 mm, foi selecionado como resposta sendo relacionado com o grau de enchimento e o tempo de residência da polpa através do modelo proposto na equação 1:

$$FP = FN + Ge[1 - \exp(-b.t_r)] \quad (1)$$

Onde:

FP é quantidade de finos no produto (% passante em 0,037 mm);

FN é a quantidade inicial de finos naturais presentes no minério (% passante em 0,037 mm);

Ge é o grau de enchimento (%);

t<sub>r</sub> é o tempo de residência da polpa no *scrubber* (min);

b é uma constante do modelo, característica do material, a ser estimada por meio de regressões.

Para fins de modelagem, decidiu-se realizar nova campanha de ensaios complementares de laboratório, com tempos de residência de polpa de 2 e 4 minutos, de forma a consolidar a base de dados e as análises subsequentes. Eles foram executados em ordem aleatória e em duplicata. A Tabela VI apresenta o sumário de todos os dados experimentais utilizados na estimação da constante “b” do modelo proposto, para o processo de escrubagem, em escala de laboratório, da bauxita de Paragominas. A estimação numérica da constante “b” do modelo foi obtida por regressão não-linear, utilizando o *software Statistica® Release 8*, por meio do método de Levenberg-Marquardt. A constante “b” do modelo foi estimada, utilizando-se os valores dos parâmetros Ge,  $t_r$ , FN e FP de todas as condições ensaiadas, simultaneamente, com um intervalo de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), usando-se os dados da Tabela VI.

**Tabela VI – Dados experimentais utilizados na modelagem**

Condição	Variável Operacional não significativa	Ensaio	Ge(%)	$t_r$ (min)	FP (% Passante em 0,037 mm)
1	Vr 28,4% Vc	FN	0	0	22,8
		1	5	1	26,0
		9	5	2	26,7
		3	5	3	27,9
		11	5	4	25,8
2	Vr 28,4% Vc	FN	0	0	22,8
		2	10	1	28,8
		10	10	2	28,6
		4	10	3	31,1
		12	10	4	27,8
3	Vr 41,4% Vc	FN	0	0	22,8
		5	5	1	28,5
		13	5	2	28,3
		7	5	3	29,6
		15	5	4	27,3
4	Vr 41,4% Vc	FN	0	0	22,8
		6	10	1	33,2
		14	10	2	36,4
		8	10	3	34,1
		16	10	4	34,1

Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da constante “b” estimada, numérica e simultaneamente, para as 4 condições diferentes, da operação de escrubagem, utilizadas neste trabalho foram, respectivamente, 0,8511 e  $1,765 \pm 0,729$ .

Os valores da quantidade de finos, no produto escrubado, previstos pelo modelo apresentaram uma boa aproximação com os dados experimentais, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de  $\pm 10\%$  de desvio, em relação à reta identidade que fornece a igualdade entre os valores experimentais e os previstos.

## 5. VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram realizados ensaios de escrubagem, em processo contínuo e escala piloto, para verificação de aplicabilidade do modelo proposto desenvolvido em processo descontínuo de laboratório. Os ensaios foram realizados numa instalação piloto de escrubagem montada ao lado da usina industrial da MBP. A unidade piloto era constituída dos seguintes equipamentos: *Scrubber* com relação de aspecto (L/D) 2:1; *Trommel* com abertura da tela da peneira de 6,35

mm (1/4"); Transportador de correia; Caixa de alimentação; Motor de 15 cv com redutor para acionamento do *scrubber-trommel*.

A campanha consistiu na execução de uma programação de dez ensaios no *scrubber* piloto com o mesmo minério utilizado nos ensaios de laboratório, proveniente do platô Miltônia 3, sob diferentes condições operacionais, com retirada de amostras representativas dos fluxos de alimentação, *oversize* e *undersize*. A distribuição granulométrica da alimentação mostrou que cerca de 32,6% das partículas estavam abaixo de 0,037 mm.

Validar um modelo significa comprovar que ele gera resultados muito parecidos com os do sistema real. A validação consiste na comparação dos dados gerados pelo modelo com os obtidos do sistema real. Para tanto, devem ser utilizados procedimentos estatísticos. A estatística dos testes paramétricos foi utilizada como forma de validar os resultados previstos pelo modelo proposto, para os ensaios de escrubagem de bauxita em escala piloto (COSTA NETO,1977). O teste de hipóteses foi empregado para verificar a aplicabilidade do modelo desenvolvido em escala de laboratório, para a operação de escrubagem em escala piloto realizada.

Os resultados experimentais foram comparados com os previstos pelo modelo e admitiu-se a hipótese nula de que os resultados não são diferentes. A hipótese foi testada com grau de confiança de 99% e bilateral, ou seja, nível de significância igual a 1%.

O resultado do teste de hipótese foi de aceitar a hipótese nula, ou seja, a de que os resultados dos valores experimentais e os dos valores previstos não são diferentes, no nível de significância de 1%. Portanto, ao aceitar-se a hipótese de igualdade entre as médias dos valores experimentais e dos previstos, não se afirma que as médias dos valores são iguais. Constata-se, na realidade, que não há evidência de que as médias dos valores sejam diferentes, ou seja, que o modelo consegue prevê o desempenho da operação de escrubagem com uma precisão razoavelmente boa.

Os valores da quantidade de finos no produto escrubado previstos pelo modelo apresentaram uma excelente aproximação com os dados experimentais, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de  $\pm 10\%$  de desvio, em relação à reta identidade, que fornece a igualdade entre os valores experimentais e os previstos.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados dos ensaios experimentais, as principais conclusões do trabalho foram:

1. Dentre os parâmetros operacionais estudados em escala de laboratório, o grau de enchimento foi o que produziu efeito estatisticamente mais significativo, no nível de 90% de confiança, na desagregação da bauxita;
2. Não se verificou efeito de interação estatisticamente significativo na desagregação da bauxita, no nível de 90% de confiança, entre os parâmetros operacionais estudados na faixa experimental investigada;
3. O parâmetro tempo de residência da polpa não apresentou efeito estatisticamente significativo na desagregação da bauxita, no nível de 90% de confiança. Entretanto, este parâmetro foi considerado no desenvolvimento do modelo, juntamente com o grau de enchimento, por ele ser bastante utilizado no dimensionamento de unidades de escrubagem.
4. O modelo desenvolvido foi o seguinte:

$$FP = FN + Ge[1 - \exp(-b \cdot t_r)],$$



onde: FP é quantidade de finos produzidos na operação de escrubagem da bauxita, FN é a quantidade inicial de finos naturais presentes no minério e a parcela  $Ge[1-\exp(-b.t_r)]$  representa a quantidade de finos gerados. Reitera-se que neste trabalho, consideraram-se finos, as partículas com tamanhos inferiores a 0,037mm (400#).

5. Os valores da quantidade de finos, no produto escrubado, previstos pelo modelo apresentaram uma boa aproximação com os dados experimentais da operação em escala piloto, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de  $\pm 10\%$  de desvio, em relação à reta identidade.

6. O resultado do teste de hipótese foi de aceitar a hipótese nula, ou seja, a hipótese de que os resultados dos valores experimentais da operação de escrubagem, em escala piloto, e os dos valores previstos pelo modelo, não são diferentes, no nível de significância de 1%.

7. O modelo proposto é empírico e restrito ao minério ensaiado.

8. Em função da ausência, na literatura consultada, de trabalhos dedicados à modelagem da operação de escrubagem, o modelo aqui desenvolvido representa, portanto, um recurso inovador para previsão de desempenho e otimização do processo de escrubagem de bauxita.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPA Campus Belém pelo apoio na realização deste trabalho, à CAPES pela concessão da bolsa, à Vale pelo fornecimento das amostras e autorização para realização dos ensaios de escrubagem em sua planta piloto.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, F. E.; REIS, R. L. G. **Miraí, a mais nova unidade de bauxita da CBA já opera em ritmo quase normal**. Brasil Mineral, São Paulo, n. 276, p. 26 – 29, agosto 2008.

BARROS NETO, B. et al. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001. 401 p.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 264 p.

LIMA, J. R. B. de. **Estudo da modelagem matemática da microciclonação**. 1997. 162 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MILLER, G. Drum scrubber design and selection. In: CONFERENCE ON METALLURGICAL PLANT DESIGN AND OPERATING STRATEGIES, 2004, Perth. **Metallurgical plant design and operating strategies**. Carlton: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004. p. 529 – 539.

TAGGART, A.F. **Handbook of mineral dressing**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1945. v.1, p.10-01 a 10-16