



# APLICAÇÃO DO MODELO DE AUSTIN PARA SIMULAÇÃO DE MOINHO VERTICAL\*

*Douglas Batista Mazzinghy<sup>1</sup>*

*Claudio Luiz Schneider<sup>2</sup>*

## Resumo

O moinho vertical normalmente é dimensionado através da aplicação de um fator de eficiência sobre o Índice de Trabalho de Bond (BWI) ou sobre o consumo específico de energia (kWh/t) obtido através de teste em moinho de bolas de laboratório. Para confirmar o dimensionamento do moinho vertical são realizados testes em escala piloto com grandes volumes de amostras. O presente trabalho apresenta uma metodologia para simulação de moinho vertical através de testes de moagem em escala de laboratório utilizando um moinho de bolas convencional e amostras bitoladas em diferentes faixas granulométricas. A amostra de minério de ferro estudada foi utilizada em uma campanha de testes em escala piloto com moinho vertical. As simulações realizadas utilizando a metodologia de Austin apresentaram muito boa correlação com os resultados dos testes em escala piloto.

**Palavras-chave:** Moinho vertical; Modelo de Austin; Mono-tamanho; Simulação.

## APPLYING THE AUSTIN MODEL FOR VERTICAL MILL SIMULATION

### Abstract

The vertical mill is usually designed by applying an efficiency factor on the Bond Work Index (BWI) or on the specific energy consumption (kWh/t) obtained through testing in a laboratory scale ball mill. To confirm the vertical mill design, pilot scale tests are performed with large volume samples. This paper presents a methodology for simulating the vertical mill from laboratory scale tests using a conventional lab-scale ball mill and samples screened in narrow sizes. A sample of iron ore was used in a test campaign with a pilot scale vertical mill. Simulations, using the Austin model, showed good correlation with the pilot scale test results.

**Keywords:** Vertical mill; Austin model; Mono-size; Simulation.

<sup>1</sup> Engenheiro de Minas, Doutor, Engenheiro Especialista, Desenvolvimento de Processos, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Pesquisador Sênior, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



## 1 INTRODUÇÃO

O moinho vertical normalmente é dimensionado através da aplicação de um fator de eficiência sobre o Índice de Trabalho de Bond (BWI) [1] ou sobre o consumo específico de energia (kWh/t) obtido através de teste em moinho de bolas de laboratório.

Recentemente o modelo do balanço populacional foi aplicado com sucesso para simular testes contínuos em escala piloto com moinho vertical [2-4]. Os parâmetros de quebra utilizados nas simulações foram determinados através de testes com moinho de bolas em escala de laboratório. A taxa de quebra das partículas (função seleção) foi ajustada através de um fator de escalonamento, pois o moinho vertical possui taxas de quebra mais elevadas que o moinho de bolas. A Metso, fabricante do moinho vertical, chamado de *Vertimill*<sup>TM</sup>, adota um fator de 0,65 sobre o consumo específico de energia (kWh/t) obtido em testes de batelada com moinho de bolas (Jar Test).

O presente trabalho tem como objetivo verificar o desempenho do moinho vertical, em escala piloto, alimentado com material de distribuição granulométrica de moagem primária (100% < 6,3mm). Além disso, o trabalho apresenta os resultados da aplicação do Modelo de Austin [5] sobre os dados do teste em escala piloto com moinho vertical.

### 1.1 Balanço Populacional para a Moagem em Batelada

A Equação 1 descreve o modelo do balanço populacional para a moagem em batelada [5].

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

sendo:

$m_i(t)$  = fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho  $i$  após o tempo  $t$  de moagem;

$S_i$  = função seleção, ou taxa de quebra, das partículas no intervalo de tamanho  $i$  ( $\text{min}^{-1}$ );

$b_{ij}$  = função quebra, ou fração em massa de partículas no intervalo de tamanho  $i$  produzidas pela quebra de partículas no intervalo de tamanho  $j$ .

### 1.2 Função Seleção

A Equação 2 apresenta um modelo para a função seleção [5].

$$S_i = S1 \left( \frac{d_i}{d_0} \right)^\alpha, \quad d_i \ll d \quad (2)$$

sendo:

$S1$  e  $\alpha$  = parâmetros arbitrários do modelo da função seleção, dependentes das condições de moagem e do minério;

$d_i$  = diâmetro das partículas do intervalo de tamanho  $i$  (mm);

$d_0$  = tamanho de normalização (mm);

$d$  = diâmetro das bolas de reposição "make-up ball size" (mm).

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



A Equação 2 é aplicada quando o tamanho do corpo moedor é muito maior que o maior tamanho de partícula. Neste caso, os tamanhos envolvidos estão dentro da região de quebra normal. Na Figura 1 são apresentadas as regiões de quebra normal e anormal da função seleção.

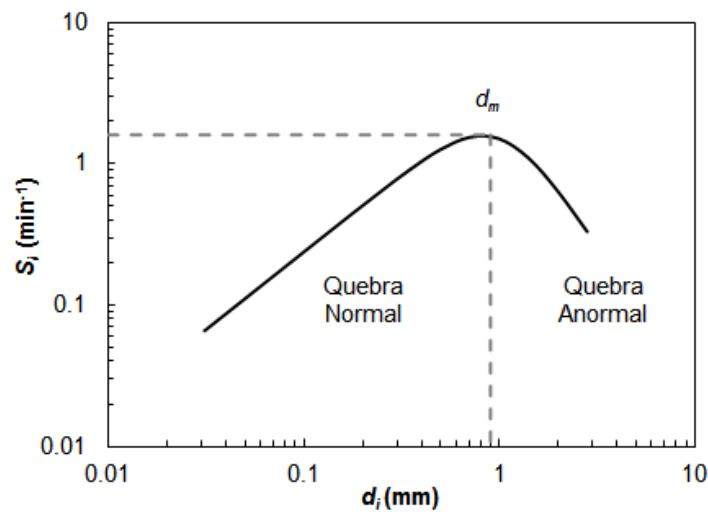


Figura 1. Função seleção (regiões de quebra normal e anormal).

A região de quebra anormal ocorre quando existem partículas grandes demais para serem fragmentadas pela maior bola da carga. A região de quebra anormal é caracterizada por uma redução das taxas de quebra a partir de um determinado tamanho de partícula  $d_m$ , chamado de tamanho crítico. Para descrever matematicamente este efeito adiciona-se mais um termo à Equação 2, conforme mostrado na Equação 3 [5].

$$S_i = S1 \left( \frac{d_i}{d_0} \right)^\alpha \frac{1}{1 + \left( \frac{d_i}{\mu} \right)^\Lambda} \quad (3)$$

sendo:

$\mu$  = parâmetro relacionado ao tamanho crítico, mm;

$\Lambda$  = número positivo que indica quão rapidamente a função seleção diminui com o aumento do tamanho das partículas.

A Equação 4 pode ser usada para determinar o tamanho crítico  $d_m$  ou tamanho no qual a função seleção é máxima [5].

$$d_m = \mu \left( \frac{\alpha}{\Lambda - \alpha} \right)^{\frac{1}{\Lambda}}, \quad \Lambda > \alpha \quad (4)$$

sendo:

$d_m$  = tamanho crítico ou tamanho no qual a função seleção é máxima (mm).

O parâmetro  $\Lambda$  é função, principalmente, do material e o parâmetro  $\mu$  é função da distribuição de tamanhos dos corpos moedores e do material.

### 1.3 Função Quebra Primária

Os valores da função quebra acumulada  $B_{ij}$  podem ser ajustados por uma relação empírica feita da soma de duas funções lineares em escala log-log, conforme mostrado na Equação 5 [5].

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



$$B_{i,j} = \phi \left( \frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1 - \phi) \left( \frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, \quad 0 \leq \phi \leq 1 \quad (5)$$

sendo:

$B_{ij}$  = função quebra acumulada;

$\beta, \phi, \gamma$  = parâmetros da função quebra dependentes das características do material.

Os termos da Equação 5 são intercambiáveis. No entanto, é praxe impor a condição  $\beta > \gamma$ , de forma que o primeiro termo descreva a produção de partículas finas e o segundo termo descreva a produção de partículas grossas. De acordo com Kelly e Sportiswood [6] dois termos são necessários para representar diferentes mecanismos de "fratura", assim o primeiro termo descreveria a região de quebra normal, na qual as partículas seriam pequenas o suficiente em relação aos corpos moedores para serem cominuídas de forma apropriada, e o segundo termo descreveria a região de quebra anormal, na qual as partículas seriam grandes demais em relação ao tamanho dos corpos moedores. Certamente esta interpretação é equivocada. As regiões de quebra normal e anormal estão associadas às taxas de moagem. A função quebra, por outro lado, é normalizada e não contém informações sobre o tamanho absoluto das partículas, somente tamanhos relativos.

#### 1.4 Efeito de Pós-Classificação em Moinhos

Dependendo da viscosidade da polpa, as partículas de maior diâmetro podem não ter a mesma habilidade de saírem do moinho como as partículas de menor diâmetro, as quais são removidas do moinho juntamente com o fluxo de polpa. Assim, a descarga do moinho funciona como um classificador, que retorna as partículas de maior diâmetro para a zona de moagem. A Equação 6 pode ser utilizada para descrever este efeito [5].

$$e(d_i) = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_i}{d_{50c}} \right)^{-\lambda}} \quad (6)$$

sendo:

$e(d_i)$  = função classificação real;

$d_i$  = diâmetro das partículas no intervalo de tamanho  $i$  (mm);

$d_{50c}$  = diâmetro (corrigido) no qual a partícula tem 50% de chance de ir para *underflow* ou *overflow*;

$\lambda$  = parâmetro relacionado à nitidez de separação.

#### 1.5 Modelagem de Peneiras de Alta Frequência

As peneiras de alta frequência podem ser modeladas através da Equação 7 [7].

$$c(d_i) = 1 - A(1 - e(d_i)) \quad (7)$$

sendo:

$c(d_i)$  = função classificação corrigida;

$e(d_i)$  = função classificação real;

$A$  = partição de água para o *undersize*.

A função classificação real  $e(d_i)$  pode ser modelada através da Equação 8 [7].

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



$$e(d_i) = \frac{\left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right)}{\left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right) + \exp\left[\alpha\left(1 - \left(\frac{d_i}{d_{50c}}\right)^3\right)\right]} \quad (8)$$

sendo:

$d_i$  = diâmetro das partículas do intervalo de tamanho  $i$  (mm);

$d_{50c}$  = diâmetro (corrigido) no qual a partícula tem 50% de chance de ir para *underflow* ou *overflow*;

$\alpha$  = parâmetro relacionado à eficiência de separação.

## 1.6 Estimativa do Hold-up e do tempo de residência

O Hold-up é a massa de material contida no moinho e pode ser estimada através da Equação 9 [8].

$$H = \left(\frac{m_b}{\rho_b}\right) \varepsilon C_v \rho_s \quad (9)$$

sendo:

$H$  = massa de material contida no moinho - *hold up* (t);

$m_b$  = massa de bolas (t);

$\rho_b$  = densidade das bolas (t/m<sup>3</sup>);

$\varepsilon$  = porosidade ou fração de vazios entre as bolas (fração);

$C_v$  = concentração de sólidos em volume (fração);

$\rho_s$  = densidade dos sólidos (t/m<sup>3</sup>).

O tempo de residência médio  $\tau$  pode ser estimado através da Equação 10 [8].

$$\tau = \frac{H}{Q_s} \quad (10)$$

sendo:

$\tau$  = tempo de residência médio das partículas (h);

$Q_s$  = vazão de sólidos (t/h).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Amostra

O minério estudado teve a sua distribuição granulométrica adequada, através de britagem e peneiramento, para 100% < 6,3mm. A amostra apresentou um perfil granulométrico típico de amostra bimodal, com pequena quantidade de material nas frações grossas e elevada quantidade de finos. O teste em escala piloto foi conduzido de forma a obter um produto final com  $P_{80} = 100 \mu\text{m}$ .

### 2.2 Teste em Escala Piloto

O moinho vertical foi operado em circuito direto com peneira de alta frequência como classificador externo. A peneira foi operada com baixa eficiência de forma a simular o corte de um hidrociclone. Foi adotada uma velocidade da espiral de 87 RPM. A

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Tabela 1 mostra a distribuição da carga de bolas adotada no teste em escala piloto.

**Tabela 1.** Distribuição da carga de bolas do teste piloto

Bola (mm)	35	30	25	19	12
Ret. (%)	38,4	27,5	14,5	17,7	1,9

Os principais fluxos do circuito foram amostrados para determinação da concentração de sólidos e distribuição granulométrica. As vazões foram monitoradas através de balança e medidores de vazão instalados no circuito. Os dados coletados durante o teste foram utilizados para fechamento do balanço de massas utilizando o aplicativo *Moly-Cop Tools*<sup>TM</sup> [9].

### 2.3 Teste de Moagem em Laboratório

O teste com frações estreitas de tamanhos de partículas é uma referência para o dimensionamento de moinhos de bolas industriais [5;8;10]. O teste é realizado em um moinho de diâmetro e comprimento iguais, oito aletas igualmente espaçadas (*lifters*), bolas de apenas um tamanho com diâmetro igual a 1/10 do diâmetro do moinho  $D_m$ , enchimento de bolas  $J = 20\%$ , enchimento de material  $U = 50\%$  e porcentagem da velocidade crítica  $V_c = 70\%$ .

Normalmente, são testadas no mínimo três faixas estreitas de tamanho na razão  $\sqrt{2}$  a seco e uma faixa em duplicata a úmido para determinação da velocidade de quebra para a moagem a úmido [10].

Neste trabalho foram testadas 12 faixas estreitas de tamanhos:

- 6,350 x 4,760mm;
- 3,350 x 2,360mm;
- 1,180 x 0,840mm;
- 0,840 x 0,600mm;
- 0,600 x 0,425mm;
- 0,425 x 0,300mm;
- 0,300 x 0,212mm;
- 0,212 x 0,150mm;
- 0,150 x 0,105mm;
- 0,105 x 0,075mm;
- 0,075 x 0,053mm;
- 0,053 x 0,038mm.

Os intervalos de tempo de moagem foram estimados assumindo-se taxas de quebra de primeira ordem e objetivando-se obter distribuições granulométricas igualmente espaçadas, de tal forma que seja possível determinar as funções seleção e quebra para um amplo intervalo de tamanhos de partículas, tendo a última curva de moagem um  $P_{80}$  próximo do desejado como produto do circuito de moagem industrial ou piloto que se deseja simular.

### 2.4 Parâmetros de Quebra

Os parâmetros de quebra foram determinados através dos resultados dos testes em moinho de bolas em escala de laboratório utilizando o programa *BatchMill*<sup>TM</sup> [11]. O programa interpola as distribuições granulométricas para encontrar os parâmetros

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



de quebra que melhor representam uma ampla faixa granulométrica de alimentação do moinho.

## 2.5 Simulações

As simulações foram realizadas com o software de simulação de plantas de processamento mineral *ModSim*<sup>TM</sup> [12]. O moinho vertical foi simulado utilizando o modelo de Austin implementado no *ModSim*<sup>TM</sup> (Modelo GMI1).

Os parâmetros de classificação foram determinados através do módulo *CurveFit* do *ModSim*<sup>TM</sup> *Professional* utilizando os dados do balanço de massas gerado a partir dos dados coletados durante o teste piloto com o moinho vertical.

A simulação foi realizada utilizando os parâmetros de quebra medidos em laboratório. Em seguida foi avaliado se o moinho vertical possuía o efeito de pós-classificação através do módulo *CurveFit* do *ModSim*<sup>TM</sup>.

Os parâmetros de pós-classificação interna e de classificação externa foram determinados utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt [12].

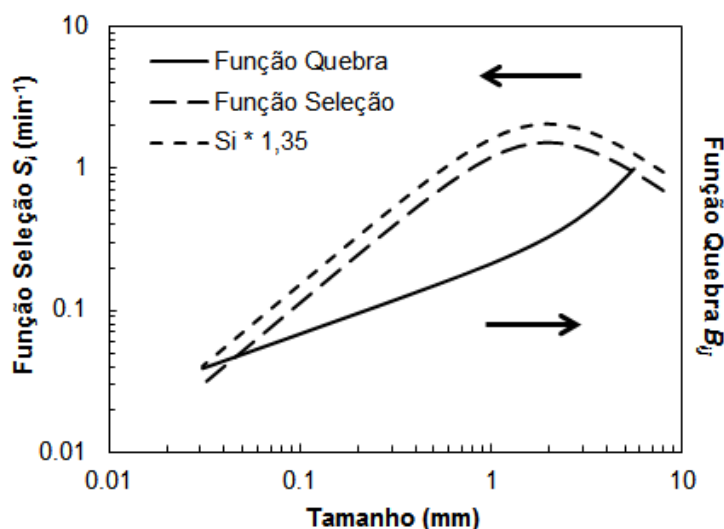
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de quebra obtidos a partir dos ensaios com partículas bitoladas em faixas estreitas de tamanho moídas no moinho de bolas de laboratório.

Função Seleção		Função Quebra				
S1 (min <sup>-1</sup> )	$\alpha$	$\mu$ (mm)	$\Lambda$	$\gamma$	$\beta$	$\varphi$
1,545	1,133	1,829	2,107	0,478	2,398	0,467

O material testado apresentou região de quebra anormal, com os melhores resultados de interpolação obtidos com a inclusão dos parâmetros  $\mu$  e  $\Lambda$ .

A Figura 2 apresenta os gráficos da função seleção e função quebra parametrizadas através do aplicativo *BatchMill*<sup>TM</sup>.



**Figura 2.** Função seleção e função quebra

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



É possível observar que o tamanho crítico  $d_m$ , ou tamanho no qual a função seleção é máxima, está próximo de 2 mm.

Os parâmetros de quebra foram introduzidos no simulador para previsão do comportamento do moinho vertical em escala piloto, juntamente com a massa de material contida no moinho ou *hold up*, calculada através da Equação 9 como sendo  $H = 0,089$  t. A Figura 3 mostra a tela do simulador *ModSim*<sup>TM</sup> com os detalhes do fluxograma e parâmetros utilizados. O ícone do moinho de bolas convencional é mostrado no fluxograma uma vez que o modelo GMI1 está associado aos moinhos de bolas.

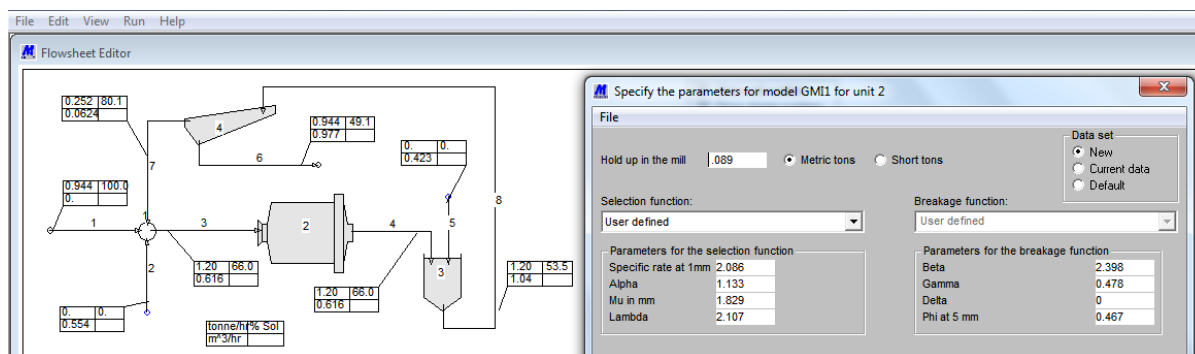


Figura 3. Tela do *ModSim*<sup>TM</sup>.

O parâmetro S1 da função seleção foi multiplicado por um fator de escalonamento igual a 1,35, tornando-se  $S1^* = 2,086$ .

Os parâmetros de classificação da peneira (classificador externo) foram determinados como sendo  $d_{50c} = 0,188$  mm,  $A = 0,94$  e  $\alpha = 2,16$ .

Em seguida foi determinada a presença de pós-classificação interna, tendo como parâmetros  $d_{50c} = 0,543$  mm e  $\lambda = 0,582$ .

A Figura 4 apresenta os resultados da simulação realizada. Os símbolos representam os dados experimentais (ajustados através do balanço de massas) e as linhas representam as distribuições granulométricas previstas com os modelos utilizados.

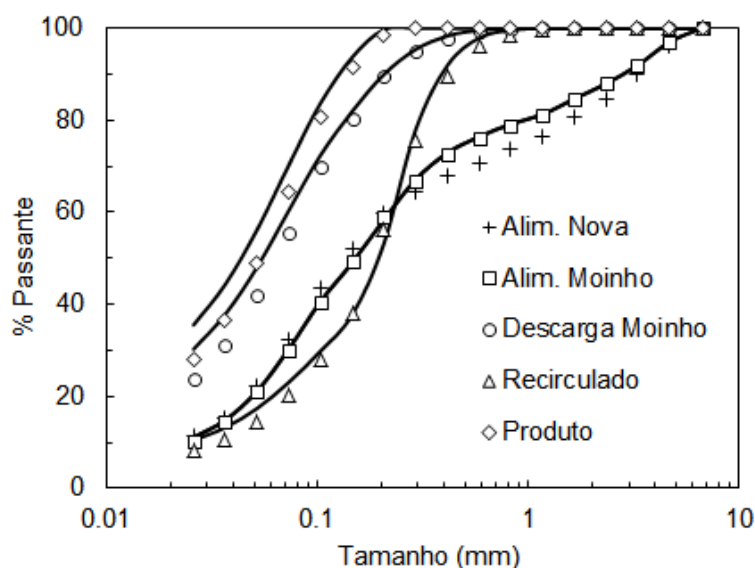


Figura 4. Previsão das distribuições granulométricas do teste piloto com moinho vertical

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.





Os resultados da simulação mostram uma maior quantidade de finos nos fluxos Descarga Moinho e Produto em relação aos valores medidos. Esta geração excessiva de finos é um problema que advém da parametrização em laboratório. Por exemplo, a função quebra determinada experimentalmente prevê uma maior produção de finos do que a observada no ensaio piloto. Possivelmente o parâmetro  $\gamma$  da função quebra deveria ser um pouco maior. Embora a geração de finos não tenha sido adequadamente descrita, as curvas geradas através do modelo de Austin estão adequadas para a simulação do teste piloto, uma vez que o erro na previsão da geração de finos não influenciou significativamente no balanço de massas ou na especificação do produto ( $d_{80}$  nos fluxos).

O tempo de residência médio das partículas foi calculado através da Equação 10 como sendo  $\tau = 4,50$  min. A simulação realizada resultou em um tempo de residência igual a  $\tau = 4,47$  min.

## 4 CONCLUSÃO

A metodologia de ensaios com frações estreitas de tamanho de partículas, normalmente utilizada para simulação de moinho de bolas, se mostrou adequada para simulação de moinho vertical, embora tenha previsto uma geração de finos um pouco exagerada. O fator de eficiência igual a 1,35, aplicado sobre o parâmetro S1 da função seleção, se mostrou adequado para simular o moinho vertical em escala piloto.

## Agradecimentos

Os ensaios de caracterização foram realizados com apoio financeiro da empresa Vale S.A., assim como todos os dados obtidos no ensaio em escala piloto. A pesquisa continuada em cominuição, incluindo caracterização, modelamento e simulação de operações de moagem têm sido realizadas com apoio financeiro da Norsk-Hydro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Bond FC. Crushing and grinding calculations. Part I, British Chemical Engineering, 1961, 6: 382.
- 2 Mazzinghy DB, Alves VK, Schneider CL, Faria P, Alvarenga T, Galéry R. Predicting the size distribution in the product and the power requirements of a pilot scale VertiMill, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Mineral Processing Conference - Procemin, Santiago, Chile, 2012: 412-420.
- 3 Mazzinghy DB, Schneider CL, Alves VK, Galéry R. Simulação de moinho vertical aplicada aos minérios de ferro, 14<sup>o</sup> Brazilian Symposium on Iron Ore, ABM, Belo Horizonte, 2013: 1081-1088.
- 4 Mazzinghy DB, Galéry R, Schneider CL, Alves VK. Scale up and Simulation of Vertimill Pilot Test Operated with Copper Ore, Journal of Materials Research and Technology, 2014, 3(1):86-89.
- 5 Austin LG, Klimpel RR, Luckie PT. Process Engineering of Size Reduction, SME - AIME, 1984.
- 6 Kelly EG, Spottiswood DJ. Introduction to Mineral Processing, John Wiley & Sons, 1982.
- 7 Rogers RSC. A classification function for vibrating screens, Powder technology, 1982, 31:135-137.
- 8 Mazzinghy DB. Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical, Belo

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



- Horizonte, Tese de Doutorado, PPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- 9 Sepúlveda, J. *Moly-Cop Tools*<sup>TM</sup> Software Package, Version 3.0, 2012.
  - 10 Alves VK, Galéry R, Peres AEC, Schneider CL. Estudo de Otimização de Carga de Moinho Utilizando Tecnologia de Simulação, XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis, 2004, 2: 227-234.
  - 11 MTI - Mineral Technologies International, Inc. *BatchMill*<sup>TM</sup> Standard Batch Test Analyzer, Manual do Usuário, 1<sup>a</sup> Edição, 2003.
  - 12 MTI - Mineral Technologies International, Inc. *Modsim*<sup>TM</sup> - MODular SIMulator for Mineral Processing Plants, Manual do Usuário, 12<sup>a</sup> Edição, 2009.

---

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*